



## 저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

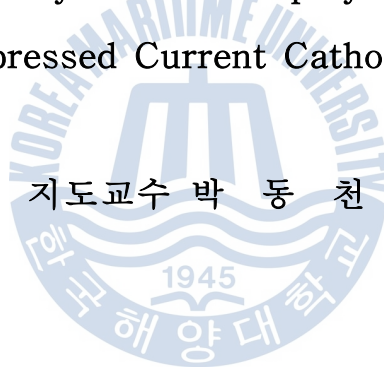
[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

# 외부전원법 적용에 있어 지오폴리머 콘크리트 사용에 따른 철근 방식을 평가

An Evaluation of Corrosion Protective Systems for  
Reinforcing Bar by Use of Geopolymer Concrete by  
Applying Impressed Current Cathodic Protection

지도교수 박 동 천



2014년 2월

한국해양대학교 대학원

해 양 건 축 공 학 과

이 해 승

본 논문을 이해승의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장

송 화 철

(인)

위 원

도 근 영

(인)

위 원

박 동 천

(인)

2013년 12월 27일

한국해양대학교 대학원

목 차 .....	iii
표 목 차 .....	v
그림목차 .....	vi
Abstract .....	viii
 1. 서론 .....	 1
1.1 연구배경 및 목적 .....	1
1.2 연구 범위 및 진행 방법 .....	4
1.3 연구의 구성 .....	5
 2. 이론적 배경 .....	 7
2.1 콘크리트 속 보강 철근의 부식 기구 .....	7
2.1.1 염소 이온과 부식 .....	8
2.1.2 부식 메커니즘 .....	9
2.2 보강 철근의 방식 .....	13
2.2.1 방식의 원리 .....	13
2.2.2 외부전원법 .....	14
2.3 지오폴리머 .....	16
 3. 실험계획 및 방법 .....	 22
3.1 실험계획 .....	22
3.2 사용재료 .....	23
3.2.1 콘크리트 .....	23
3.2.2 지오폴리머 .....	24
3.2.3 철 근 .....	25

3.2.4 양 극 재 .....	26
3.3 시험체 제작 및 외부전원법 적용 .....	27
3.3.1 시험체 제작 .....	27
3.3.2 외부전원법의 적용 .....	28
3.3.3 실험조건 및 변수 .....	29
3.4 기초물성평가 .....	30
3.4.1 슬럼프 .....	30
3.4.2 공기량 .....	30
3.4.3 압축강도 .....	30
3.5 촉진 열화 및 부식 측정 .....	31
3.5.1 촉진 열화 .....	31
3.5.2 자연전위평가 .....	33
3.5.3 철근 부식률 평가 .....	35
<b>4. 실험결과 및 분석</b> .....	<b>37</b>
4.1 재료의 물성 평가결과 .....	37
4.2 자연전위 및 철근 부식률 측정결과 .....	38
4.2.1 자연전위 .....	38
4.2.2 철근 부식률 .....	47
<b>5. 결 론</b> .....	<b>51</b>
<b>참고 문헌</b> .....	<b>53</b>

## 표 목차

[표 2-1] 지오폐리머의 특징 .....	20
[표 2-2] 지오폐리머의 적용 .....	21
[표 3-1] 시멘트의 화학적 조성 .....	23
[표 3-2] 시멘트의 물리적 성질 .....	23
[표 3-3] 시험체의 콘크리트 배합 .....	23
[표 3-4] 고로슬래그 미분말의 화학적 조성 .....	24
[표 3-5] 시험체의 지오폐리머 배합 .....	24
[표 3-6] 원형 철근의 화학적 특성(%) .....	25
[표 3-7] 방식용 양극 티타늄 메쉬 특성 .....	26
[표 3-8] 철근 주위의 환경에 따른 방식전류밀도 .....	28
[표 3-9] 다양한 염해 환경에 따른 시험체의 형상 .....	29
[표 3-10] 실험에 사용된 기호 설명 .....	29
[표 3-11] Half-Cell 측정값의 판정 .....	34
[표 4-1] 슬럼프 및 공기량 측정 결과 값 .....	37

## 그림 목차

[그림 1-1] 국내외 해안지역의 개발 .....	1
[그림 1-2] 철근 부식 사례 .....	2
[그림 1-3] 철근의 부식 환경 .....	4
[그림 1-4] 연구계획 및 진행 순서도 .....	6
[그림 2-1] 철근 부식에 의한 콘크리트 구조물의 열화 .....	7
[그림 2-2] 염소 이온에 의한 철근의 부식 과정 .....	9
[그림 2-3] 염소 이온에 의해 유발되는 철근의 부식 반응 .....	10
[그림 2-4] 부식 중 철근의 전위차 .....	11
[그림 2-5] 외부전원법의 원리 .....	15
[그림 2-6] 지오폐리머의 구성 .....	16
[그림 2-7] 고로슬래그 기반 알칼리 활성 콘크리트의 AE제 첨가량 및 W/B비 에 따른 염소 이온 확산계수 .....	18
[그림 2-8] 고로슬래그 미분말의 혼입율에 따른 염소 이온 확산계수 .....	19
[그림 2-9] 플라이애시 혼입율에 따른 염소 이온 확산계수(재령91일) .....	20
[그림 3-1] 방청처리 및 부동태피막을 제거한 원형 철근 .....	25
[그림 3-2] 티타늄 메쉬 .....	26
[그림 3-3] 시험체 도면 .....	27
[그림 3-4] 시험체에 적용된 외부전원법의 회로도 .....	28
[그림 3-5] 슬럼프 실험 .....	30
[그림 3-6] 공기량 실험 .....	30
[그림 3-7] 항온항습챔버를 이용한 촉진 부식 .....	31
[그림 3-8] 촉진 부식 실시 .....	32
[그림 3-9] 촉진 부식 온·습도 그래프 .....	32
[그림 3-10] Half-Cell Method .....	34

[그림 3-11] 자연전위 측정 위치 .....	34
[그림 3-12] 부식 면적률 측정 과정 .....	35
[그림 3-13] 부식률 측정 과정 .....	36
[그림 4-1] 압축강도 측정 결과 값 .....	38
[그림 4-2] 간만대 환경을 모의한 콘크리트 시험체의 측정결과 .....	40
[그림 4-3] 간만대 환경을 모의한 지오폴리머 시험체의 측정결과 .....	40
[그림 4-4] 침지대 환경을 모의한 콘크리트 시험체의 측정결과 .....	41
[그림 4-5] 침지대 환경을 모의한 지오폴리머 시험체의 측정결과 .....	41
[그림 4-6] 균열 환경을 모의한 콘크리트 시험체의 측정결과 .....	42
[그림 4-7] 균열 환경을 모의한 지오폴리머 시험체의 측정결과 .....	42
[그림 4-8] 측정위치에 따른 자연전위 측정값(외부전원법 비적용) .....	44
[그림 4-9] 측정위치에 따른 자연전위 측정값(외부전원법 적용) .....	45
[그림 4-10] 측정위치에 따른 자연전위 측정값(철근 부식 후 외부전원법 적용) .....	46
[그림 4-11] 철근 부식 면적률 측정값 .....	48
[그림 4-12] 철근 부식률 측정값 .....	50



# ABSTRACT

## An Evaluation of Corrosion Protective Systems for Reinforcing Bar by Use of Geopolymer Concrete by Applying Impressed Current Cathodic Protection

Lee, Hae-Seung

Dept. of Ocean Architectural Engineering  
Graduated School, Korea Maritime And Ocean University

Recently, it has been increased that concrete structure constructed in marine environment. When concrete structures are exposed under marine environment for a long time, the rebar in concrete is corroded due to the chloride penetration in the sea water. Because the damages of corrosion resulting from the chloride ion are very serious, many research have been carried out to protect those.

In this study corrosion protecting efficiency was evaluated with the comparison between common concrete and geopolymer concrete to which impressed current cathodic protection (ICCP) is applied. To be simulated in diversified salt attack environment (tidal zone, submerged zone, crack) specimens had been made. After making specimens steady temperature and humidity chamber was used to simulate for the accelerated corrosion of rebar. Half-cell method and corrosion measurement are applied to evaluate corrosion protecting efficiency and the applicability of ICCP is reviewed for each material.

# 1. 서 론

## 1.1 연구배경 및 목적

현대의 해안지역은 내륙지역 과밀화의 대안으로써 현대인들의 여가·휴양의 욕구를 충족시켜주는 공간으로 주목받고 있으며 [그림 1-1]과 같이 해안지역에 대한 국내 및 국외의 수요증가로 인한 개발은 가속화, 대규모화되어가고 있다. 이러한 수요를 맞추기 위해 해안지역에 토목사업과 해안경관을 고려한 특성화 된 주거단지와 같이 인간이 활동 및 생활을 할 수 있는 공간의 개발이 집중으로 해안가에 철근 콘크리트 구조물의 건설이 증가하고 있다. 인간의 주거 및 산업활동을 위한 공간을 만드는데 많은 기여를 하는 구조재료인 철근 콘크리트는 내구성이 우수하여 반영구적인 구조물의 축조에 적용된다. 하지만 철근 콘크리트 구조물이 해양환경에 노출될 경우 염소 이온의 침투 때문에 콘크리트 내부에 있는 철근이 부식하게 된다. 철근의 부식으로 인하여 발생하는 체적팽창압에 의하여 [그림 1-2]와 같이 콘크리트의 균열 및 박리가 발생하며 심할 경우 철근 콘크리트 구조물은 붕괴하게 된다[1].



(a) 부산시 북항 재개발 사업



(b) 미국 시애틀 항만 친수공간

[그림 1-1] 국내외 해안지역의 개발



(a) 해안지역 철근 부식 피해



(b) 철근 부식으로 인한 내구성 저하

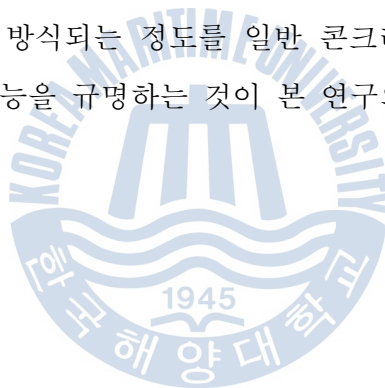
[그림 1-2] 철근 부식 사례

이러한 철근 부식을 방지하기 위한 방법으로 음극방식기법이 해양구조물에 많이 사용되고 있다. 문한영[2], 이상국[3] 등의 연구 결과를 살펴보면 음극방식은 피방식체인 철근에 방식전류를 공급함으로써 부식 반응을 억제하는 효과적인 방식법으로 해양구조물은 물론 선박과 항만시설 등까지 널리 적용되고 있다. 문홍식[4]은 해양·항만환경에 대해 여러 방식기법(철근 방청제, 음극방식기법, 피복두께에 의한 방식성능)을 비교 분석하여 음극방식기법이 적절한 기법임을 평가하였다. 음극방식기법은 방식전류의 작용매개체의 차이에 의해 크게 외부전원법과 희생양극법으로 분류된다. 특히 외부전원법은 불용성 양극을 사용함으로써 시스템의 수명이 길며 지속적으로 모니터링이 가능하여 사용이 증가하고 있다.

이광수의 특집기사[5]에 따르면 외국에서는 철근 부식 방지 대책으로 음극방식법 이외에 부식성 물질이 피복 콘크리트 중으로 침입·확산하는 것을 방지하는 방법과 부식성 물질이 철근 표면에 도달하는 것을 방지하는 방법이 주로 사용된다고 기술하였다. 해외에서는 대표적인 부식성 물질인 염소 이온의 침투 및 확산을 방지하기 위한 방법으로 지오폐리머라는 알칼리 활성 콘크리트의 연구가 진행됐으며 해안지역 등에서 도로·다리와 같은 사회기반시설건설에 활용되고 있다. 지오폐리머는 염소 이온과 같은 부식성 이온의 전이가 매우 어려워 철근의 보호성능이 우수하여 해양구조물의 보수·보강공사에 활용되고[6] 있

으며 CO<sub>2</sub>의 발생량이 적은 친환경 재료[7]로써 앞으로 국내에서도 저탄소 기조에 발맞추어 적극적으로 연구되고 상용화될 것으로 생각된다. 국내의 음극방식기법에 대한 기존연구를 살펴보면 보통콘크리트에 적용한 사례만 있을 뿐 지오폴리머 콘크리트에 적용한 연구는 전무한 실정이다. 앞으로 국내에서도 지오폴리머의 적극적인 연구와 상용화가 기대되고 있는 가운데 지오폴리머의 내염해성을 바탕으로 음극방식기법 적용기술이 확보된다면 해양구조물의 내구성이 향상될 수 있을 것으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 외부전원법 적용에 있어 지오폴리머 콘크리트 사용에 따른 철근 방식 평가를 시행하였다. 그리고 직간접적으로 극심한 염해 환경(침지대, 간만대, 콘크리트 자체의 균열)을 인위적으로 모의하여 이에 해당하는 시험체의 제작을 계획하였다. 지오폴리머를 사용하여 제작한 콘크리트의 외부전원법적용에 대한 철근이 방식되는 정도를 일반 콘크리트와 비교·분석하여 철근 부식 억제 효과 및 성능을 규명하는 것이 본 연구의 주요 목적이다.



## 1.2 연구 범위 및 진행 방법

본 연구에서는 외부전원법 적용에 있어 지오폴리머 콘크리트 사용에 따른 철근의 부식 억제 효과 및 성능을 분석하였다. 그 외 다양한 해양노출환경을 모의하고자 배합수의 해수 사용 및 해수 침지(Salt Ponding)를 이용하여 인위적으로 철근의 부식 환경을 [그림1-3]과 같이 적용하였다. 각각의 환경에 대한 철근 부식 정도는 자연전위차 및 부식률 측정을 통하여 평가하였다.



[그림1-3] 철근의 부식 환경

### 1.3 연구의 구성

본 연구의 구성에 관하여 각 장별로 요약하면 다음과 같다

1장에서는 본 연구의 배경 및 문제점을 제시하였고, 문제점을 해결하기 위한 연구의 계획, 진행방법 및 목적에 대하여 기술하였다.

2장에서는 이론적 배경으로 콘크리트 속 보강 철근의 부식 기구 및 보강 철근의 방식 원리와 지오폴리머의 특징에 대하여 기술하였다.

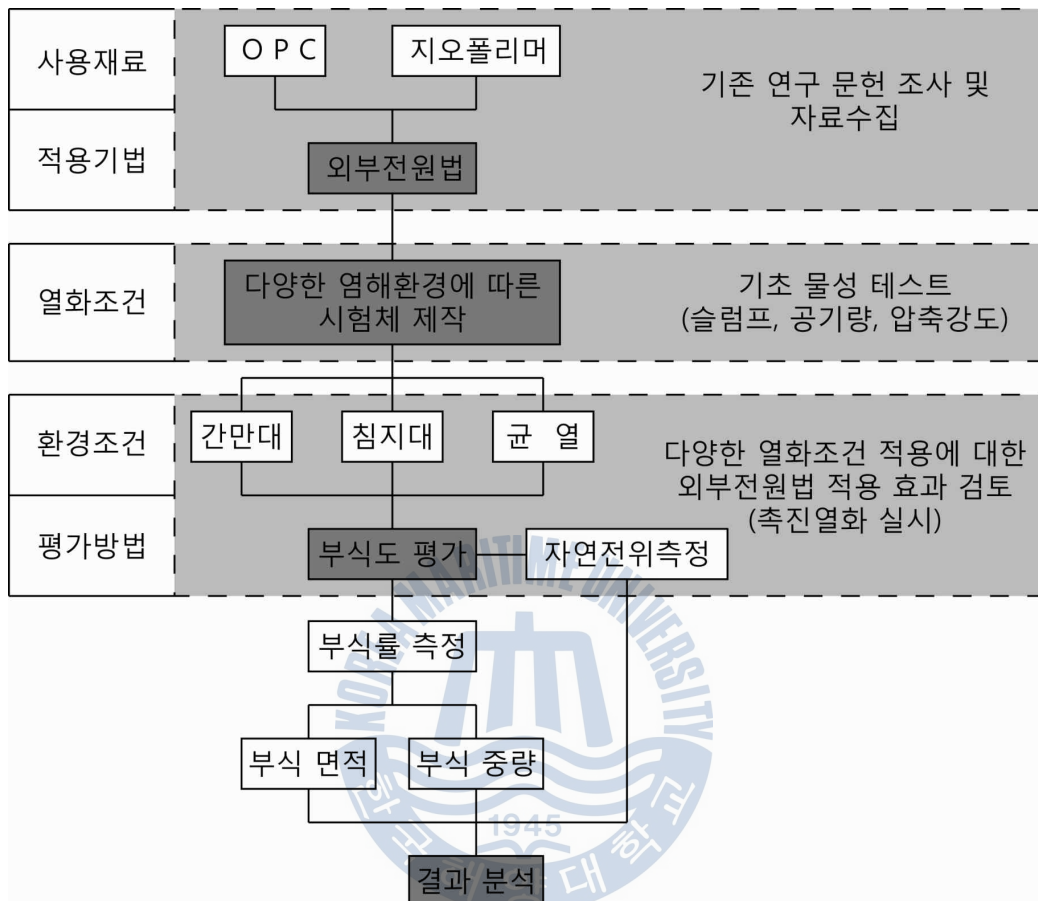
3장에서는 본 연구의 실험계획에 대하여 상세하게 나타내었다. 시험체 제작에 사용된 재료(콘크리트, 지오폴리머, 철근, 양극재)에 대한 특징과 실험과정 및 실험방법에 대하여 기술하였다.

4장에서는 실험과정을 통해 도출된 데이터들의 결과를 분석하여 각각의 시험체에 대한 철근 부식 억제 효과 및 성능을 분석하였다.

마지막으로 5장에서는 본 연구의 결론을 요약하였다.



전체적인 연구의 흐름을 [그림 1-4]에 나타내었다.



[그림 1-4] 연구계획 및 진행 순서도

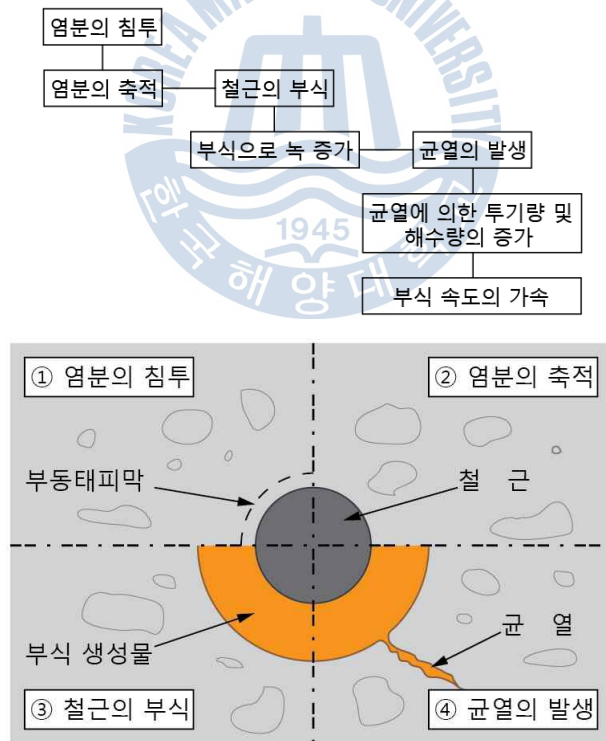


## 2. 이론적 배경

### 2.1 콘크리트 속 보강 철근의 부식 기구

철근 콘크리트 구조물은 철근 부식으로 인해 철근의 단면 손실과 강도 저하가 일어나고 콘크리트의 균열이 발생한다[8]. 이러한 구조물에 있어서 콘크리트의 균열은 자체의 강도 저하뿐만 아니라 콘크리트가 박리되는 현상으로 인해 부식을 더욱 가속시킨다[9].

해안 지역에서 균열의 발생 과정은 [그림 2-1]에 나타내었다. 염분의 침투 → 축적 → 철근의 부식 → 균열의 발생 → 눈에 보일 정도의 부식 진전이라는 과정을 거쳐 구조물에 열화가 발생한다[10].

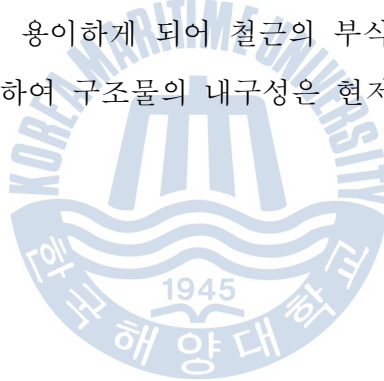


[그림 2-1] 철근 부식에 의한 콘크리트 구조물의 열화



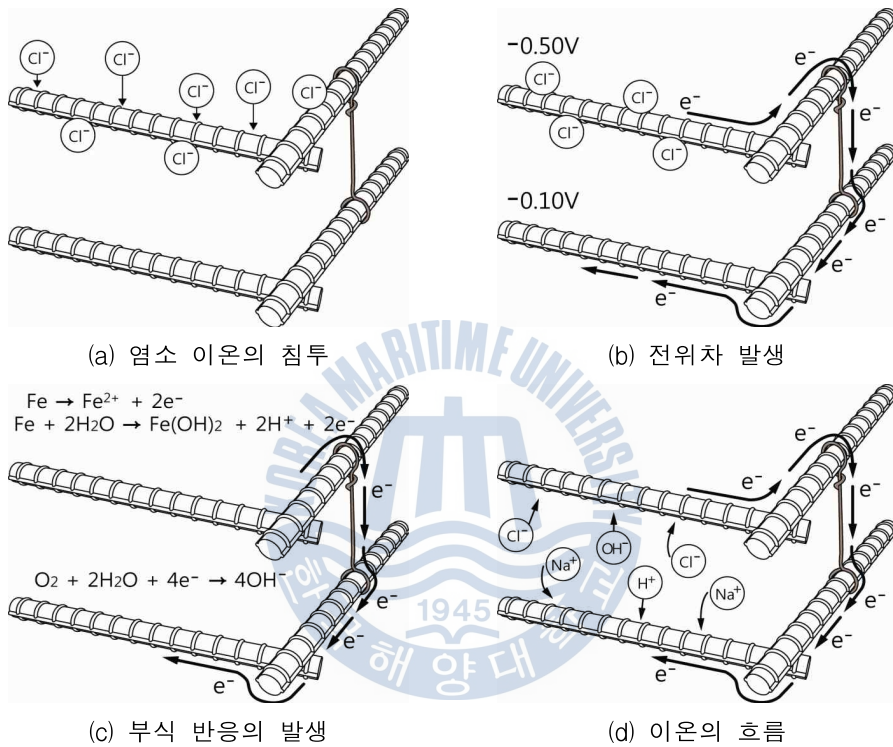
### 2.1.1 염소 이온과 부식

콘크리트의 내부에 매설된 철근의 부식은 콘크리트 구조물의 성능이 저하하는데 주요한 원인 중의 하나이다. 콘크리트는 pH가 12.5 ~ 13.0에 이르는 알칼리 상태에 있기 때문에 철근 주위에 부동태피막이라 불리는 보호막이 형성되어 부식을 억제한다. 그러나 콘크리트 구조물의 외부환경 또는 콘크리트 구조물 자체적 원인으로 인하여 콘크리트 내부에 일정량 이상의 염소 이온이나 산성 음이온이 존재하게 되는 경우, 철근 주위의 부동태피막이 파괴되고 철근은 부식하기 쉬운 상태가 된다[11]. 콘크리트 내부의 철근이 부식되면, 철근 자체의 단면이 손실되어 구조물의 전체 강도가 저하될 뿐 아니라 철근의 체적이 본래의 약 2.5배로 팽창하고, 그 팽창압으로 균열을 일으키게 된다. 균열이 발생하면 산소나 물의 공급이 용이하게 되어 철근의 부식이 더욱 촉진되고 결국에는 피복 콘크리트가 탈락하여 구조물의 내구성은 현저히 저하된다[12].



## 2.1.2 부식 메커니즘

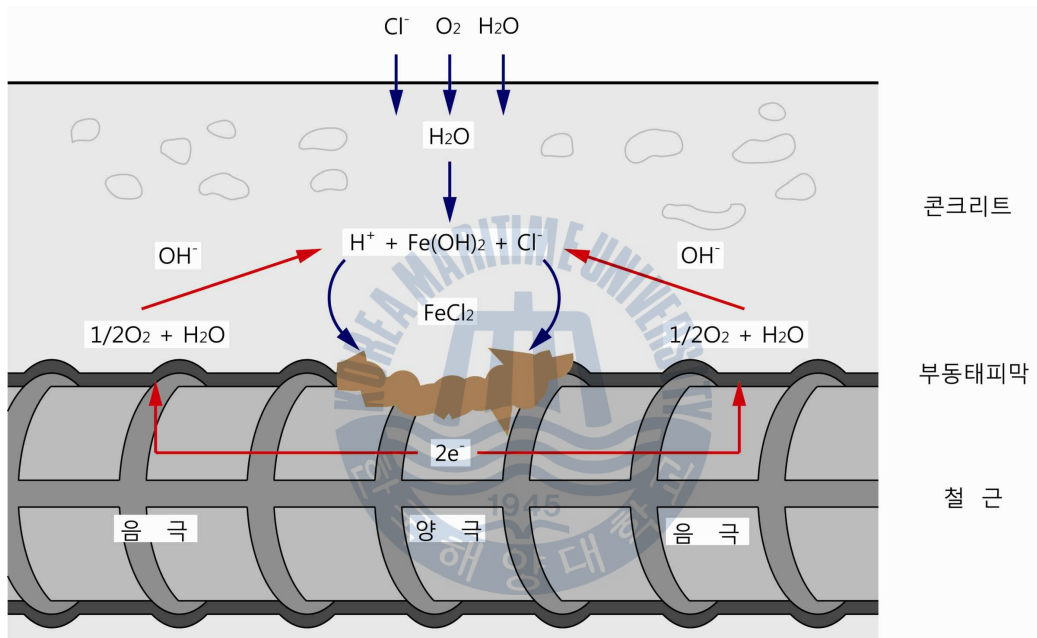
철근의 부식을 [그림 2-2]에 나타내었으며 부식 과정을 단계별로 정리하면 아래와 같이 요약할 수 있다[13].



[그림 2-2] 염소 이온에 의한 철근의 부식 과정

## (1) 염소 이온 침투

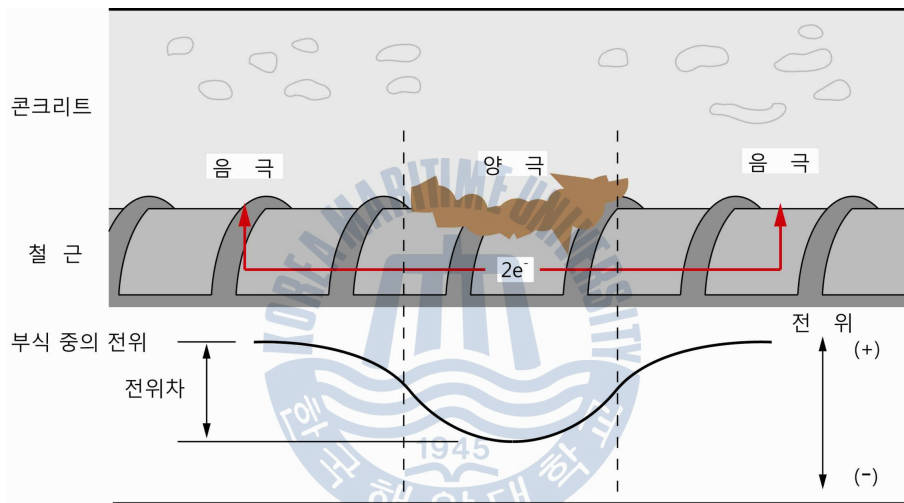
염화칼슘과 해수에 함유된 염소 이온은 콘크리트 표면에 침투하여 철근 고유의 부동태피막을 파괴한다. 표면과 가까운 철근은 가장 높은 농도의 염소 이온에 의해 가장 빨리 활성화된다[14]. [그림 2-3]에 염소 이온에 의해 유발되는 철근의 부식 반응을 나타내었다.



[그림 2-3] 염소 이온에 의해 유발되는 철근의 부식 반응

## (2) 전위차

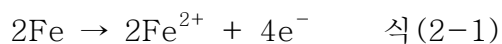
염소 이온의 농도는 구조물의 전체 구조에 걸쳐 일정하지 않기 때문에 철근 일부분만 활성화된다. 따라서 건전부와 결함부 사이에 국부적으로 전위차가 발생한다. 이러한 전위차는 [그림 2-4]에 나타난 바와 같이 철근을 통해 전자를 이동시킴으로써 부식 작용을 일으키는 전지를 형성하는 기전력으로 작용한다 [15].



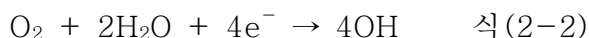
[그림 2-4] 부식 중 철근의 전위차

## (3) 부식 작용

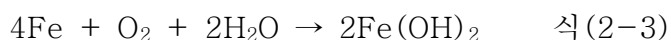
전위차는 철근에 전자의 흐름을 만드는 동시에 철근의 표면에서 전기 화학적인 반응을 일어나게 한다. 즉, 양극부에서는 전자의 생성에 따라 산화반응이 일어나 식(2-1)과 같이 철이 이온화되어 녹아 나오게 된다.



또 부동태상태로 있는 음극부에서는 전자의 소모에 의한 환원반응이 일어나 식(2-2)와 같이 수산화 이온이 생성된다.



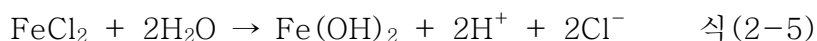
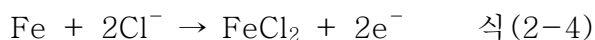
결과적으로 수산화 이온이 양극부로 이동하여 식(2-3)과 같이 부식 생성물인 수산화 제1철을 생성한다.



이 화합물은 계속해서 수분을 잃고 붉은 녹 형태의 수산화 제2철이 되거나 산화가 불충분한 채로 검은 녹( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )으로 남아 철 표면에 녹층을 형성한다.

#### (4) 이온의 흐름

부식 반응이 일어날 때 이온들은 전기적으로 중성을 유지하기 위해 전해 물질을 통해 이동한다. 음(-)으로 하전된 이온들은 양극부로 이동하고 양(+)으로 하전된 이온들은 음극부로 이동하여 전기적 회로를 구성하게 된다. 염소 이온이 양극 쪽으로 이동하면 부동태상태에 해를 끼치게 되어 부식 반응을 더욱 강화시킨다. 이것은 염소가 부식 반응에서 실제로 관여하기 때문에 발생하는 현상이다.



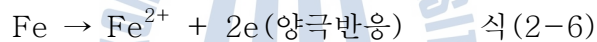
식(2-4), 식(2-5)에서 보듯이 부식 반응 과정을 통해 염소 이온은 소모되

지 않고 단지 부식 반응의 중간생성물인  $\text{FeCl}_2$ 을 형성했다가 다시 방출된다. 그리고 이와 동시에 양극에서 수소 이온이 발생하여 양극부의 pH를 낮춤으로써 부식에 더욱 유리한 환경을 만들게 된다[17].

## 2.2 보강 철근의 방식

### 2.2.1 방식의 원리

금속표면을 음전위 방향으로 분극하게 되면 금속의 부식이 방해되어 부식 속도가 현저히 줄어든다[18]. 예를 들어, 철이 염산용액에 담겨져 있다면 철의 양극(식(2-6)) 부분과 음극(식(2-7)) 부분에서는 다음과 같은 반응이 일어나서 부식이 일어나게 된다.



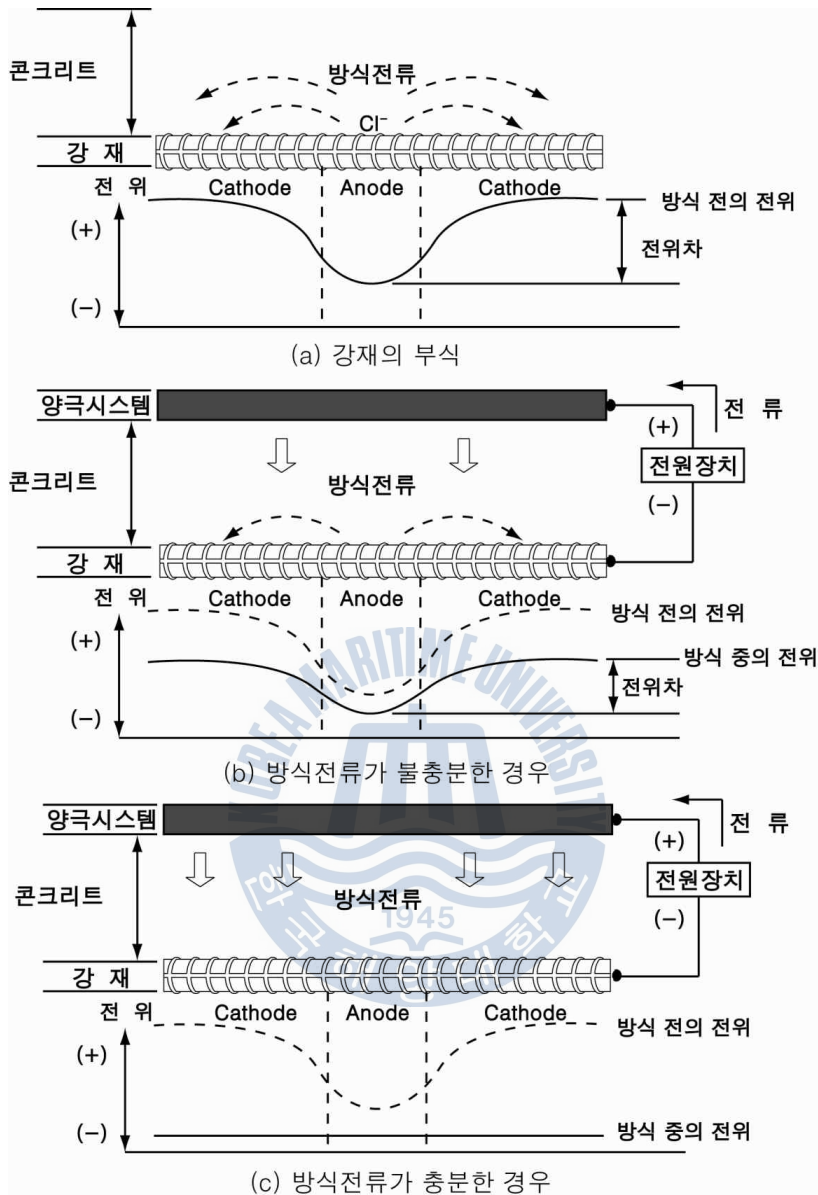
위 반응에서 전자는 철이 부식되면서 생산되어 음극에서 수소를 발생시키는 데 소비되고 있다. 만약 외부에서 전자가 공급된다면 양극반응에 의한 전자의 공급이 불필요하게 되므로 양극반응은 더 이상 필요하지 않게 된다. 다시 말해서, 철의 부식이 일어나지 않는다. 이것이 음극방식의 원리이다[19].

## 2.2.2 외부전원법(impressed current cathodic protection, ICCP)

외부전원법(ICCP)은 방식전류를 외부전원장치로부터 철근으로 강제로 흐르게 하는 음극방식법이다. 외부전원법의 개념도는 [그림 2-5]와 같다. 방식하고자 하는 철 구조물을 외부전원장치의 (-)극과 연결하고 (-)극에서 (+)극으로 방식전류를 흐르게 하기 위한 직류전원을 얻기 위해 직류를 교류로 바꾸주는 정류기(Rectifier)를 설치하는데 이를 양극과 함께 (+)극에 연결하여 회로를 형성한다[20].

양극에서는 산화반응을 통해 전자를 방출하여 음극의 산화반응을 억제하는 역할을 하는데, 장기간 사용하고 안정된 전류를 공급해야 하기 때문에 소모성이 적은 금속이나 특수 표면처리된 금속을 사용해야 하며 주로 티타늄(Ti), 나이오븀(Nb) 또는 아크(또는 열) 용사 코팅된 티타늄 등이 많이 사용된다. 또한, 구조물의 구조와 방식전류의 분포에 따라 리본형, 메쉬형, 분리형 등 다양한 형태의 양극이 적용된다.

[그림 2-5]를 보면 알 수 있듯이 강재(철근)에 부식이 발생하면 건전부(Cathode)와 결함부(Anode)사이에서 전위차가 발생한다. 전위차는 강재를 통해 전자를 이동시킴으로써 부식 작용을 일으키는 전지를 형성하는 기전력으로 작용한다. 이때 전원장치(외부전원)와 양극시스템을 적용하여 적절한 방식전류를 공급하면 강재 내부의 전위차가 발생하지 않기 때문에 완전히 방식된다. 그러나 적절한 방식전류를 공급하지 못할 경우 강재 내부에 전위차가 존재하므로 완전히 방식되지 못한다[21].



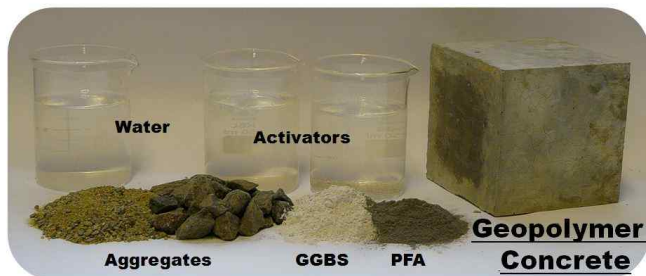
[그림 2-5] 외부전원법의 원리



## 2.3 지오폐리머

### (1) 지오폐리머의 개념

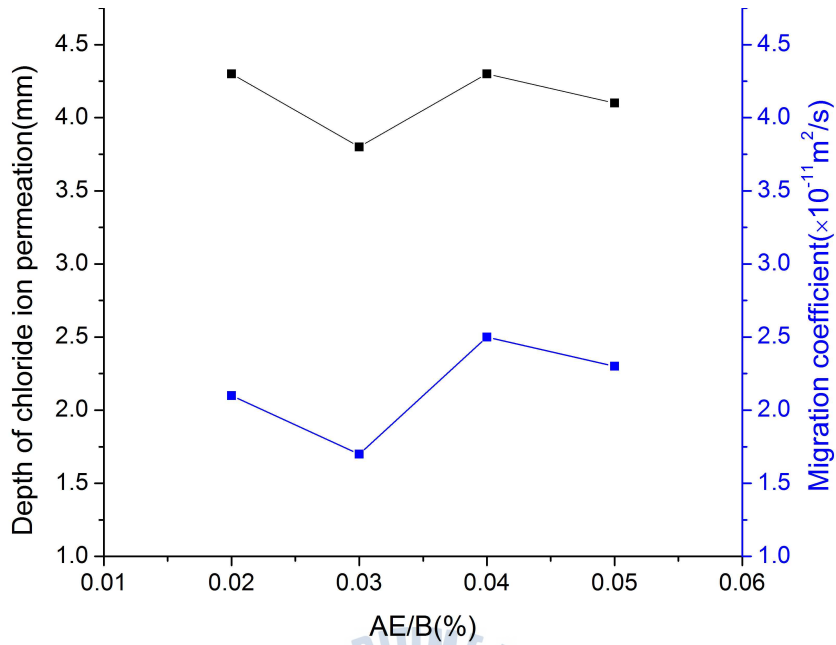
포틀랜드 시멘트의 1톤 제조 시 소성공정에서 대기 중에 약 1톤의  $\text{CO}_2$ 가 발생하며 전 세계  $\text{CO}_2$  방출량의 약 5%를 구성한다[22].  $\text{CO}_2$  발생에 따른 지구온난화를 막기 위해 소성공정을 도입하지 않은 새로운 개념의 비소성 무기계 바인더의 개발이 진행되고 있다. 현재 비소성 무기바인더의 역할을 수행할 수 있는 물질로는 산업부산물인 플라이애시, 슬래그 등과 천연원료인 점토, 카올린 등이 있다[23]. 그 중에 플라이애시는 자체적으로 수화할 수는 없으나 알칼리와 반응하여 수화물을 생성하는 포졸란 반응성 물질로써 알칼리 용액에 의해 활성화되면 알루미노실리카 겔(aluminosilicate gel)이라는 물질이 생성된다. 생성된 알루미노실리카 겔은 바인더로 작용하여 입자들을 결합하거나 혹은 화학적으로 결합한 하나의 세라믹 덩어리로 만들어지게 되는데, 이러한 알루미노실리카 겔을 지오폐리머(geopolymer)라 명명한다[24]. [그림 2-6]과 같이 지오폐리머 콘크리트는 결합재로써 소성 바인더인 포틀랜드 시멘트를 사용하지 않는 콘크리트로써, 규소(Si)와 알루미늄(Al)이 풍부한 플라이애시와 같은 무기물을 알칼리성 액체로 활성화시켜 결합재로 사용한 콘크리트를 말한다.



[그림 2-6] 지오폐리머의 구성[25]

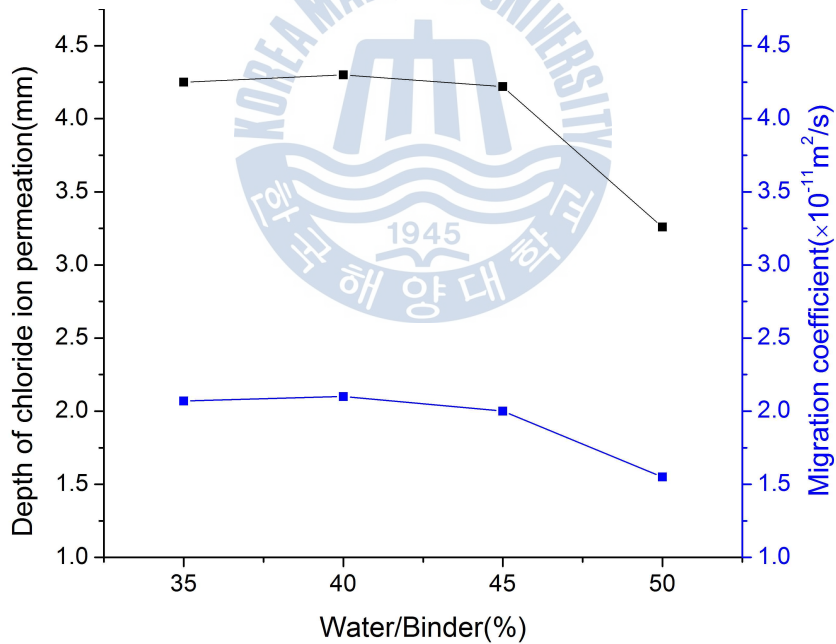
## (2) 지오폴리머의 특성

해양환경에 접하고 있는 해양구조물의 내구성 설계에서 내황산염 시멘트 등의 사용을 권장하고 있지만, 앞에서 언급하였듯이 비소성 바인더를 이용한 지오폴리머를 사용하여 지구온난화를 막기 위한 방안으로 시멘트 사용을 줄일 필요가 있다. 그리고 지오폴리머 사용에 따른 구조물의 콘크리트 내부 공극의 크기 감소와 경화 조직의 치밀화로 인해 화학적 침식에 대한 영구적인 대책을 갖는 방안을 모색해야 할 필요가 있다. 이에 국내에서도 최근 해양환경에 적절한 지오폴리머를 사용하여 내구성을 만족하게 하는 방안에 대한 연구가 진행되고 있다. 기존 연구를 살펴보면 송진규 등[26]은 [그림 2-7]과 같이 고로슬래그 기반 알칼리 활성 콘크리트의 공극분포가 염해 저항성에 미치는 영향에 대해 연구하였고, 김홍삼 등[27]은 고로슬래그 미분말을 사용할 경우 염소 이온의 투과성이 낮아지고 고로슬래그를 다량 치환할 경우 염해에 대한 저항성이 우수해진다고 [그림 2-8]과 같이 분석하였다. 또한, 최순석 등[28]은 [그림 2-9]와 같이 플라이애시의 혼입량이 증가할수록 염소 이온의 확산계수가 낮아진다고 분석하였다. 국외에서도 지오폴리머의 내염해성에 대한 연구가 진행되고 있고 그 외 압축강도와 같은 다양한 특징에 대해 연구가 활발히 이루어지고 있으며 [표 2-1]에 지오폴리머의 대표적인 특징과 국내외의 연구결과를 요약하여 나타내었다.



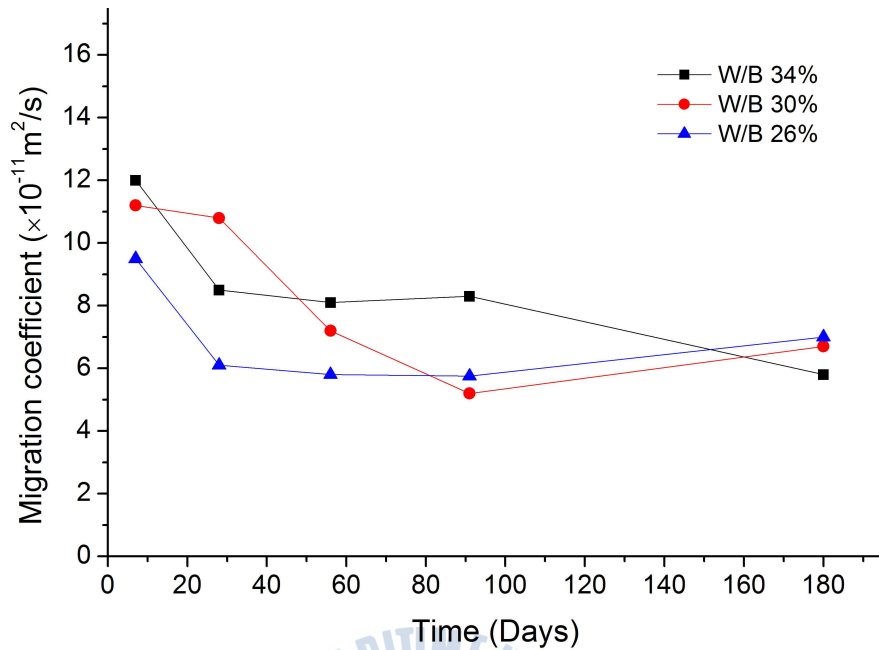
AE/B(%)

(a) AE제

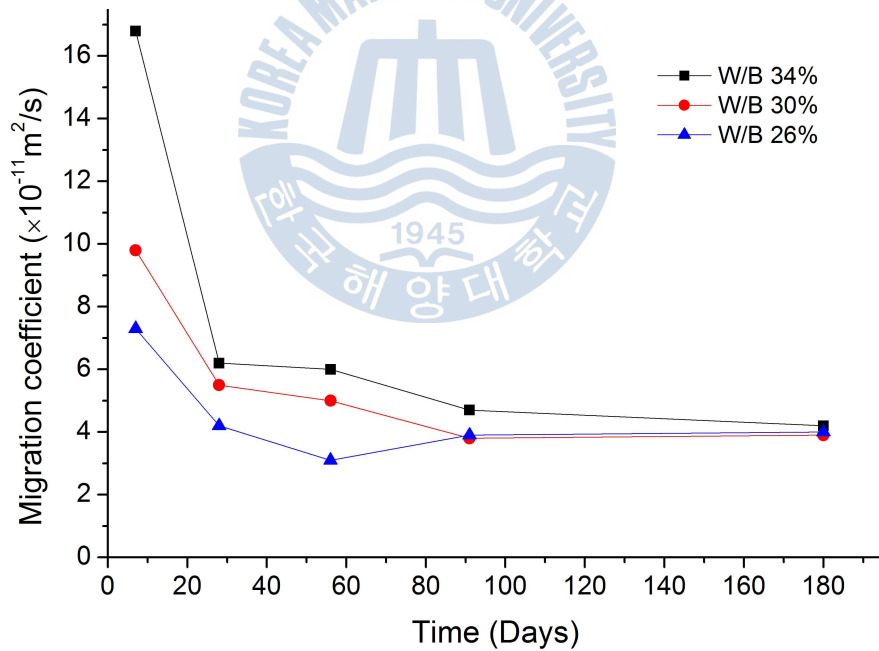


(b) W/B

[그림 2-7] 고로슬래그 기반 알칼리 활성 콘크리트의  
AE제 첨가량 및 W/B비에 따른 염소 이온 확산계수

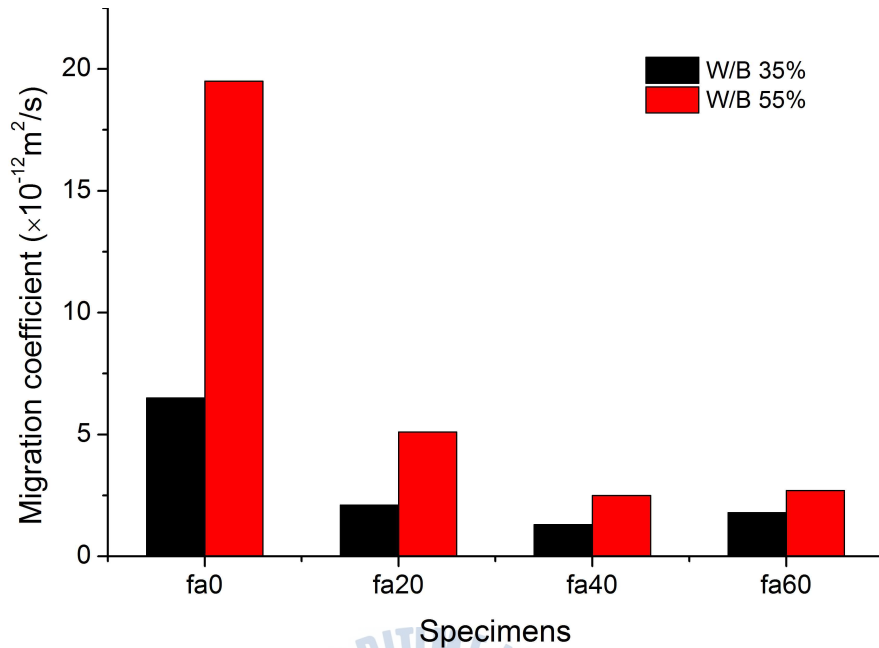


(a) OPC



(b) 고로슬래그 혼입 45%

[그림 2-8] 고로슬래그 미분말의 혼입률에 따른 염소 이온 확산계수



[그림 2-9] 플라이애시 혼입률에 따른 염소 이온 확산계수(재령91일)

[표 2-1] 지오폴리머의 특징[29]

지오폴리머	특 징
압축강도	·혼화재 첨가 없이도 100MPa이상의 강도확보 가능 ·초기뿐 아니라 장기재령의 강도 발현도 우수함
낮은 배합수	·콘크리트 제조 시 물-결합재비 17~22%정도 사용
낮은 수화열	·포틀랜드시멘트 콘크리트의 약 1/3~1/2수준
내약품성	·치밀한 내부조직 및 매트릭스 간의 강한 경계요소 가짐
동결융해저항성	·낮은 배합수와 높은 전해질 농도
철근 보호성	·염소 이온과 같은 부식성 이온의 전이가 매우 어려움
비용 및 에너지 절감	·10~40%의 비용, 60~80%의 석탄소비량 및 50%의 전기소비량이 절감
내화성능	·700℃ 이상에서도 성능 유지 가능

### (3) 지오폐리머의 적용

지오폐리머는 CO<sub>2</sub>의 발생량이 적은 친환경 재료로써 여러 가지 산업에서 다양하게 활용 가능한 고성능 재료이다. 지오폐리머는 고강도 및 조기강도, 내화성, 내화학적 등의 다양한 특성이 있으며 이러한 특성을 바탕으로 내화·내열 섬유 복합체와 밀폐제, 콘크리트 등에 적용이 가능하다. 또한, 낮은 투수성을 가지고 있어 유동성, 방사성 폐기물 차단제의 용도로 사용이 가능하며 높은 내구성으로 해양구조물이나 산성 환경에 노출된 구조물 등에 적용이 가능하다. [표 2-2]에 지오폐리머가 실제로 적용된 사례에 대해 정리하여 나타내었다.

[표 2-2] 지오폐리머의 적용[29]

용 도	국 가	이 용
콘크리트	우크라이나	·1982년 농장 옹벽공사 ·1990년 주거용 건물
	러시아	·1984년 도로공사 60km시공 ·1990년 24층 주거용 거닐 구조체
	중 국	·1988년 호북성 6층 상업용 건물
		·교량 지간길이 12.6m
보수, 보강재	미 국	·해안지역 도로, 다리의 보수보강 ·LA공항 활주로 보수
	일 본	·건축물의 기둥 피복
내열, 내화재료	프랑스, 영국	·1985년 이후 원자력발전소의 설비 수선용
	독 일	·미네랄플라스틱을 개발하여 내화재료로 활용
벽 돌		·LTGS저온소성벽돌
건축물 외장재		·지오폐리스톤

### 3. 실험계획 및 방법

#### 3.1 실험계획

본 연구에서는 외부전원법 적용에 있어 콘크리트와 지오폴리머를 이용하여 다양한 염해 환경(조수대, 침지대, 균열 등)에 노출된 시험체를 제작하였으며 철근의 부식률을 평가하기 위해 실험을 진행하였다. 그리고 철근 부식 후 외부전원법을 적용하였을 경우 부식 진행의 변화에 대한 평가를 추가로 진행하였다. 동일한 압축강도의 시험체를 제작하기 위해 설계기준강도 31MPa의 배합을 설정하였다. 이후 철근 콘크리트의 촉진 부식 시험방법에 따라 항온항습챔버를 이용한 시험체의 촉진 열화를 진행하였다. 촉진 열화 진행 중에 1~2주를 주기로 Half-Cell을 이용한 자연전위차를 측정하여 각 시험체의 철근의 부식 진행상태에 대해 살펴보았다. 촉진 열화 종료 후 시험체 내부에 매설된 철근을 꺼내어 철근의 부식 면적 및 부식 생성물의 중량을 측정하여 결과를 정리하였다.

## 3.2 사용재료

### 3.2.1 콘크리트

본 실험에서 제작한 콘크리트 시험체는 KS L 5201의 규정에 적합한 비표면적이  $3,130\text{cm}^2/\text{g}$ 인 S사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 그 화학적 조성과 물리적 성질은 각각 [표 3-1], [표 3-2]에 나타내었다. 31MPa 설계 기준강도로 제작한 콘크리트 시험체의 배합비는 [표 3-3]과 같다.

[표 3-1] 시멘트의 화학적 조성<sup>※</sup>

성분	lg.loss	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
구성비(%)	1.0	21.1	2.9	62.5	3.3	2.2	6.5

※ S사의 실험결과표

[표 3-2] 시멘트의 물리적 성질<sup>※</sup>

비중	분말도 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	안정성 양호	응결시간		압축강도		
			초결	종결	3일	7일	28일
3.15	3,130		4h	6h	198	272	389

※ S사의 실험결과표

[표 3-3] 시험체의 콘크리트 배합

G <sub>max</sub> (mm)	Slump (cm)	Va (%)	W/C (%)	S/a (%)	단위용적( $\text{L}/\text{m}^3$ )			단위질량( $\text{kg}/\text{m}^3$ )			AE감수제 ( $\text{g}/\text{m}^3$ )
					C	S	G	C	S	G	
15	16±2	5.0±1.0	51	38.8	108	261	412	341	679	1092	102.3



### 3.2.2 지오폐리머

본 실험에서 사용한 지오폐리머는 고로슬래그 미분말을 기반으로 하였으며 알칼리성 활성제로는 수산화나트륨을 사용하였다. 고로슬래그 미분말의 화학적 조성은 [표 3-4]에 나타내었다. 31MPa 설계기준강도로 제작한 지오폐리머 시험체의 배합은 [표 3-5]와 같다.

[표 3-4] 고로슬래그 미분말의 화학적 조성

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>3</sub>	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)
31.57	13.58	43.26	0.38	4.86	4.53	0.41	0.55	4300

[표 3-5] 시험체의 지오폐리머 배합

단위질량(kg/m <sup>3</sup> )				AE감수제 (g/m <sup>3</sup> )
W	B	S	G	
180	450	707	980	135

### 3.2.3 철 근

본 실험에 사용된 철근은 [그림 3-1]과 같이 직경 13mm의 원형 철근(KS D 3526)을 사용하였다. 단시간에 시험체 내부의 철근을 부식시키기 위하여 철근의 방청처리 및 부동태피막을 No.600의 샌드페이퍼(KS L 6003)를 이용하여 연마 후 아세톤(KS M ISO 6353-2)으로 닦아내었다. 주기적으로 자연전위측정을 하기 위해서 철근의 한쪽 끝을 통신전용 전선을 납땜으로 연결하였다. [표 3-6]에 사용한 철근의 화학조성을 나타내었다.



[그림 3-1] 방청처리 및 부동태피막을 제거한 원형 철근

[표 3-6] 원형 철근의 화학적 특성(%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn
0.24	0.26	0.95	0.016	0.008	0.03	0.04	0.01	0.02	0.0005

### 3.2.4 양 극 재

방식전류를 공급할 양극재료로는 ASTM 265에 규정된 1등급의 견고한 Titanium 기체에 소결시킨 산화 귀금속 촉매로 구성된 양극이며 본 연구에서는 LIDA CN-25 티타늄 메쉬를 사용하였다. 본 연구에 사용된 방식용 양극의 재료의 특성은 [표 3-7]과 같으며 [그림 3-2]는 실제 사용된 티타늄 메쉬양극의 모습을 나타내고 있다.



[그림 3-2] 티타늄 메쉬

[표 3-7] 방식용 양극 티타늄 메쉬 특성

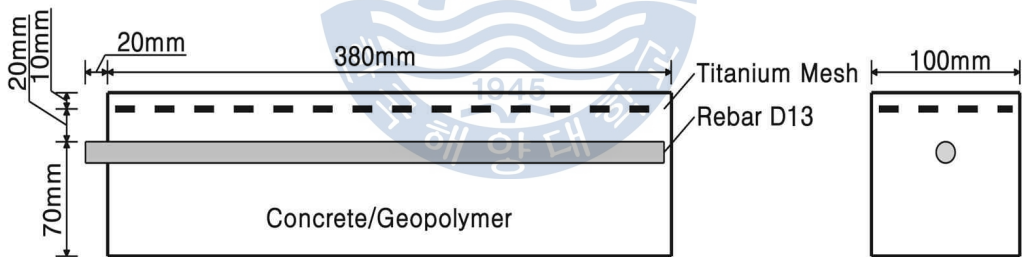
Size (mm)	Thickness (mm)	Max current density in concrete (mA/m <sup>2</sup> )	Max current density in rebar (mA/m <sup>2</sup> )	Electric resistance (Ω/m)
40×19	2	40	110	0.011

### 3.3 시험체 제작 및 외부전원법 적용

#### 3.3.1 시험체 제작

본 실험에서 제작한 시험체는 [그림 3-3]과 같이  $100 \times 100 \times 380\text{mm}$  크기의 콘크리트 시험체에 표면에서부터 30mm 깊이에 직경 13mm의 원형 철근을 설치하였다. 철근 위 20mm 위치에 전류를 공급해 줄 티타늄 메쉬를 고정 한 후, 그 위에 다시 10mm 두께로 콘크리트를 덮어 타설하였다. 외부전원법을 적용하지 않는 시험체의 경우에도 티타늄 메쉬를 매입하지 않은 동일한 크기의 시험체를 제작하였다.

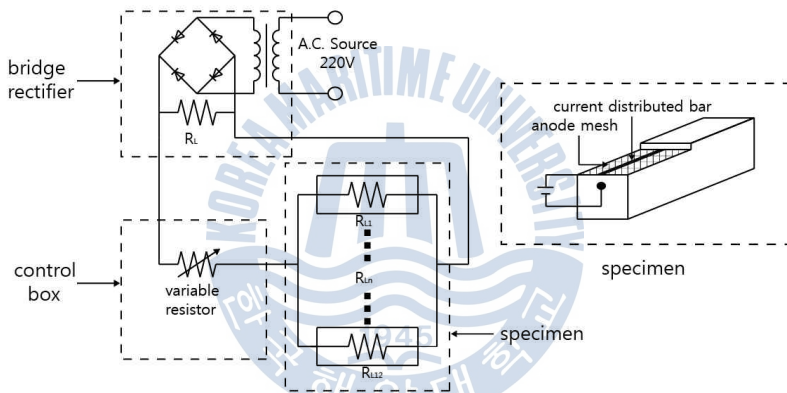
시험체 타설 후 28일 양생이 끝난 후 부식 환경 노출구간으로 설정한 상부면을 제외한 시험체의 전면에 에폭시 방수 코팅을 하였다.



[그림 3-3] 시험체 도면

### 3.3.2 외부전원법의 적용

외부에서 철근의 방식에 필요한 직류전류를 공급하기 위하여 정전압 직류전원 공급장치를 사용하였으며 회로를 구성할 때 외부전원의 (-)극에 철근을 (+)극에 메쉬전극을 연결하여 전류가 메쉬에서 철근으로 흐르게 하였다. 방식대상 시험체에 1V 미만의 미소 직류전압을 가하고 각각의 시험체에 적절한 방식전류를 공급할 수 있도록 가변저항을 연결하였다. [그림 3-4]는 시험체의 전체회로도를 나타내었다. 촉진 열화 실험으로 인한 건습반복환경으로 인해 [표 3-8]을 참조하여  $50\text{mA/m}^2$ 의 방식전류밀도를 공급하였다.



[그림 3-4] 시험체에 적용된 외부전원법의 회로도

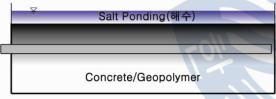
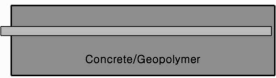
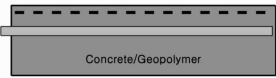
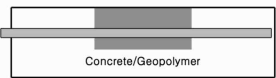
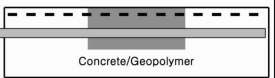
[표 3-8] 철근 주위의 환경에 따른 방식전류밀도[30]

철근 환경	방식전류밀도 ( $\text{mA/m}^2$ )
알카리환경, 부식 미발생, 낮은 산소 농도	0.1
알카리환경, 부식 미발생, 대기 노출	0~3
알카리환경, 염화물 존재, 건조 상태, 양질콘크리트, 피복두께 큼, 미미한 부식 관찰	3~7
염화물 존재, 습한 상태, 저질 콘크리트, 피복두께 보통, 넓은 범위의 공식(pitting)발생, 일반 부식 발생	8~20
고농도 염화물, 건습반복환경, 높은 산소농도, 고온, 심한 부식 상태, 얇은 피복두께	30~50

### 3.3.3 실험조건 및 변수

다양한 염해 환경을 적용하기 위해 [표 3-9]와 같이 간만대, 침지대, 균열로 나누어 염해 환경에 적합하게 시험체를 제작하였으며 실험 인자들의 표기와 명칭을 [표 3-10]과 같이 나타내었다. 간만대(T)의 경우 해수를 이용한 해수침지를 시험체에 적용하였다. 해수를 3일간 공급하고 용액을 제거한 다음 4일간 해수 없이 노출시켜 건조하는 과정을 1주기로 하는 해수침지를 실시하였다. 침지대(S)의 경우 철근 부근까지 이미 염소 이온이 확산된 상태라 가정하여 시험체 제작을 위한 배합을 진행할 때 배합수를 해수로 사용하였다. 그리고 균열(C)의 경우 균열의 발생으로 해수가 균열부 근방으로 침투된 상태라 가정하고 시험체 일부분(12cm)을 해수로 배합하여 시험체를 제작하였다.

[표 3-9] 다양한 염해 환경에 따른 시험체의 형상

	외부전원법 비적용 (N)	외부전원법 적용 (I)	철근 부식 후 외부전원법 적용 (AI)
간만대 (T)			
	C/G-T-N	C/G-T-I	C/G-T-AI
침지대 (S)			
	C/G-S-N	C/G-S-I	C/G-S-AI
균열 (C)			
	C/G-C-N	C/G-C-I	C/G-C-AI

[표 3-10] 실험에 사용된 기호 설명

첫 번째 기호	두 번째 기호	세 번째 기호
C : 콘크리트 G : 지오폴리머	T : tidal zone(간만대) S : submerged zone(침지대) C : crack(균열)	N : 외부전원법 비적용 I : 외부전원법 적용 AI : 부식 후 외부전원법 적용

### 3.4 기초물성평가

#### 3.4.1 슬럼프

슬럼프 측정은 KS F 2402(콘크리트 슬럼프 시험방법)에 따라 실시하였다.

#### 3.4.2 공기량

공기량 측정은 KS F 2421(굳지 않은 콘크리트의 압력법에 의한 공기 함유량 시험방법)에 따라 실시하였다. [그림 3-5], [그림 3-6]은 슬럼프와 공기량 실험을 나타낸 것이다.



[그림 3-5] 슬럼프 실험



[그림 3-6] 공기량 실험

#### 3.4.3 압축강도

압축강도 실험은 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)의 시험방법에 따라 측정하였고, 100ton 용량의 U.T.M(만능시험기)을 이용하여 3개 공시체의 평균값을 실험결과로 채택하였다.

### 3.5 촉진 열화 및 부식 측정

#### 3.5.1 촉진 열화

시험체 속의 원형 철근의 부식을 촉진시키기 위해 철근 콘크리트의 촉진 부식 시험방법(KS F 2599-2)에 의거하여 실시하였다. [그림 3-7], [그림 3-8]과 같이 항온항습챔버를 이용하여 건조 및 습윤한 환경을 반복하여 조절하였다. [그림 3-9]와 같이 건조한 환경은 온도 15℃, 습도 70%로 4일간 유지하였고, 습윤한 환경은 온도 70℃, 습도 90%로 3일간 유지하여 부식 촉진을 실시하였다.

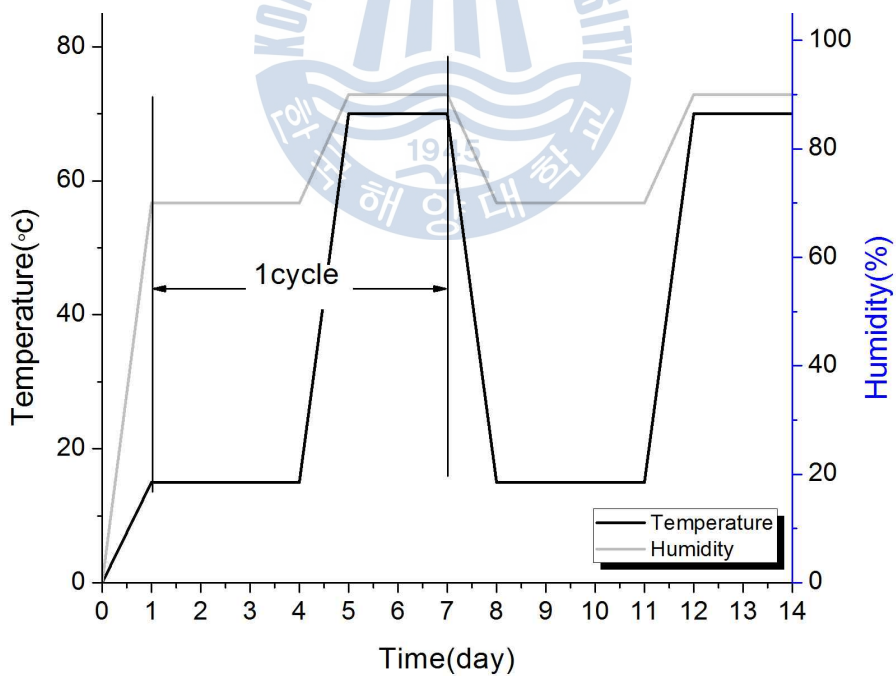


[그림 3-7] 항온항습챔버를 이용한 촉진 부식





[그림 3-8] 촉진 부식 실시



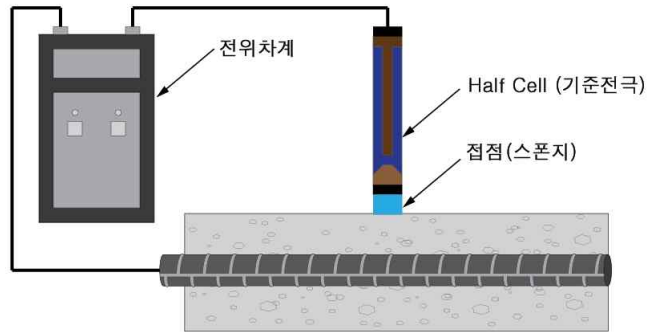
[그림 3-9] 촉진 부식 온·습도 그래프

### 3.5.2 자연전위평가

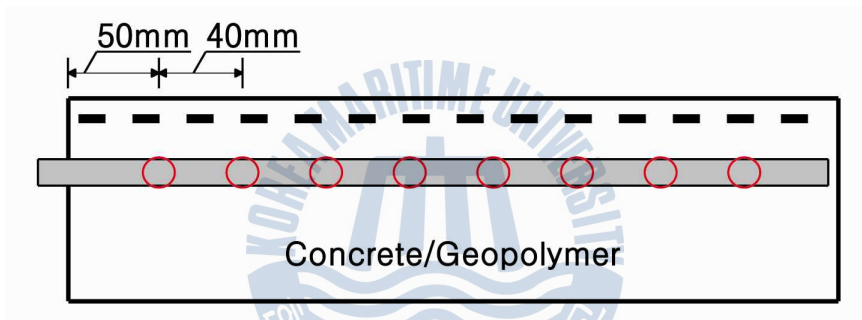
자연전위란 금속이 존재하는 환경 속에서 유지하고 있는 전위를 말하며 부식의 양극 및 음극 반응에 의한 전위의 분극으로부터 결정된다. 자연전위는 환경이나 철근의 상황에 따라 변화하며 전위측정법은 기본적으로 이러한 전위의 변화로부터 철근의 부식 여부를 판정하는 방법으로 대표적으로 자연전위측정법이 있다. 자연전위측정법은 그 원리가 단순하고 측정도 간단하여 특수한 측정 기구가 필요하지 않아 가장 많이 이용되고 있다. 본 연구에서는 ASTM C876-91 규정에 따라서 자연전위를 평가하였다. 자연전위를 측정하기 위해서는 철근에서 발생한 이온을 받아줄 수 있는 대조전극(Counter Electrode)이 필요하며 이와 같은 대극을 기준전극(Reference Electrode)이라고 한다. 기준전극으로 황산구리전극(Copper/Copper Sulphate Electrode(CSE))을 사용할 경우 황산구리 용액 속의 구리와 콘크리트 속의 철근 간에 발생하는 전위를 측정할 수 있도록 볼트미터(Voltmeter)에 연결시킨다[31].

본 연구의 전극 전위측정법 원리는 [그림 3-10]에 나타내었다. [그림 2-4]에서 보면 알 수 있듯이 철근에 부식이 발생할 경우 부식 부분 결함부(Anode)가 되어 건전부(Cathode)사이에 전위차가 발생한다. 이를 살펴보기 위해 균열을 가정한 시험체의 경우 [그림 3-11]과 같이 Half-Cell의 측정 위치를 정하여 자연전위차를 평가하였다.

황산구리전극(CSE)을 사용하여 측정된 자연전극 전위값을 이용하여 철근의 부식 정도 평가기준을 ASTM C876-91 에서는 [표 3-11]과 같이 규정하고 있다.



[그림 3-10] Half-Cell Method



[그림 3-11] 자연전위 측정 위치

[표 3-11] Half-Cell 측정값의 판정[32]

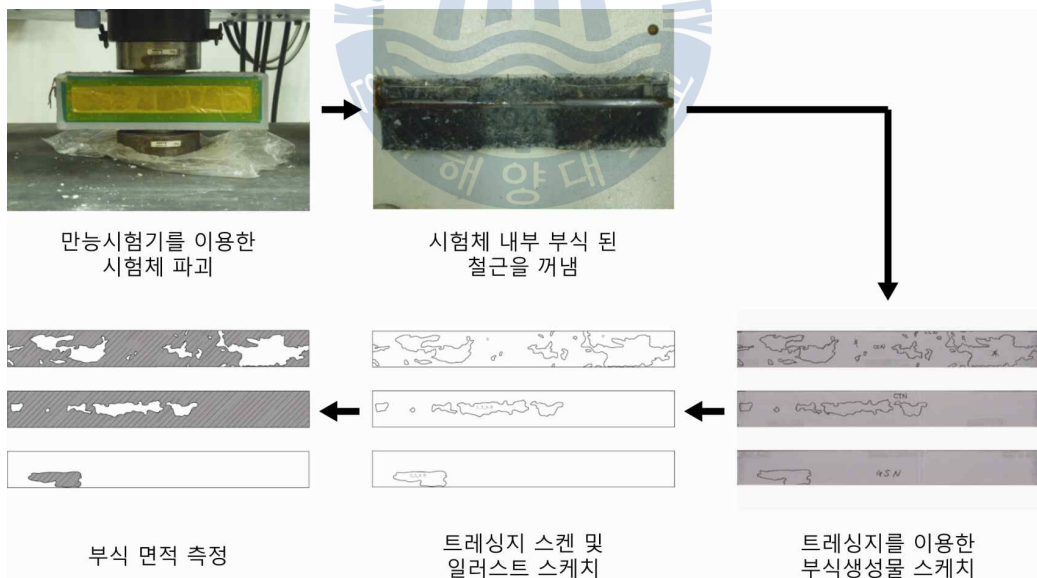
전위차	평 가
-200mV 이상	90% 이상 측정 한 곳에서 철근의 부식이 일어나지 않고 있음
-200mV ~ -350mV	이 범위에서 철근의 부식이 진행되는지에 대해 확실하지 않음
-350mV 이하	90% 이상 측정 한 곳에서 철근의 부식이 일어나고 있음
-500mV 이하	부식으로 인하여 반 이상 크랙이 존재함
+mV 로 표시될 경우	철근과의 접속이 좋지 않거나 콘크리트 표면에 습기가 충분하지 않음. 혹은 외부에서 미세한 전류가 유입되고 있음

### 3.5.3 철근 부식을 평가

#### (1) 철근 부식 면적률

촉진 열화 실험 종료 후 시험체 속의 철근 부식 면적을 측정하여 철근의 부식 면적률을 나타내었다. 부식 면적률은 부식 발생 부위를 트레싱지로 스케치하여 철근 전개도를 제작하였다. 이후 부식 발생 부분의 면적의 합을 컴퓨터 그래픽 화상처리법을 이용하여 구하였다. 측정한 철근의 부식 면적과 철근 전개도의 전체면적의 비를 이용하여 부식 면적률을 식(3-1)과 같이 나타내었다. 부식 면적률 측정 과정은 [그림 3-12]에 나타내었다[2].

$$\text{부식 면적률(\%)} = \left( \frac{\text{철근전개도의 부식 면적}}{\text{철근전개도의 전체 면적}} \right) \times 100 \quad \text{식 (3-1)}$$

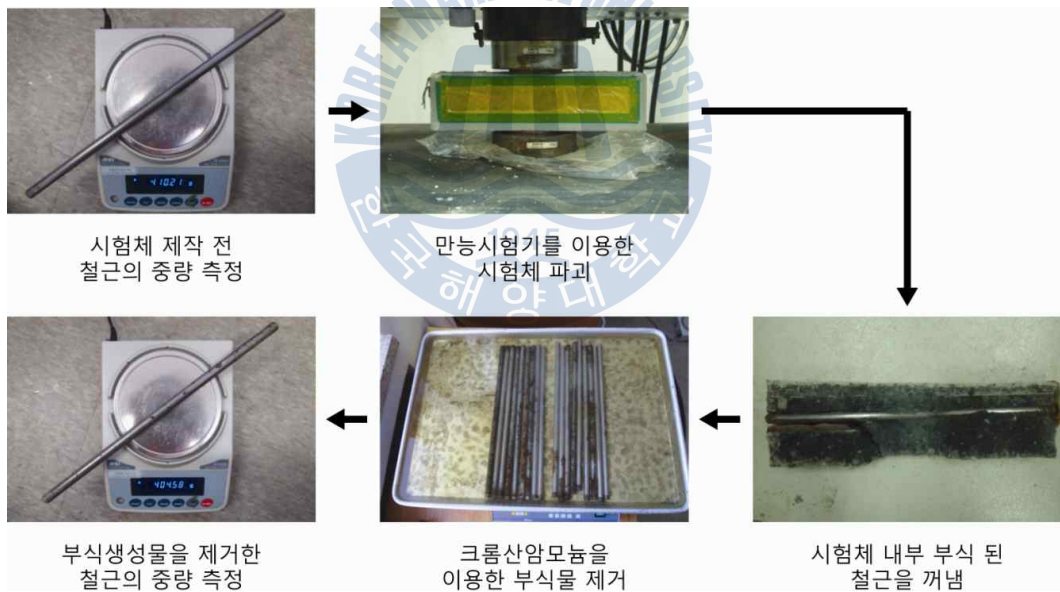


[그림 3-12] 부식 면적률 측정 과정

## (2) 부식률

부식에 의한 철근 체적 손실은 각 시험체의 부식 후 철근 중량에서 부식 생성물 제거 후 철근 중량을 뺀 값이며 부식 후 철근 중량 측정에 있어 부식 생성물은 ASTM G1(Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens)에 의한 방법으로 제거하였다. 따라서 철근의 부식률은 식(3-2)와 같이 중량 감소율법으로 구했으며 부식률 측정 과정은 [그림 3-13]에 나타내었다[33].

$$\text{부식률}(\%) = \left(1 - \frac{\text{부식 후 철근 중량}}{\text{부식 전 철근 중량}}\right) \times 100 \quad \text{식(3-2)}$$



[그림 3-13] 부식률 측정 과정

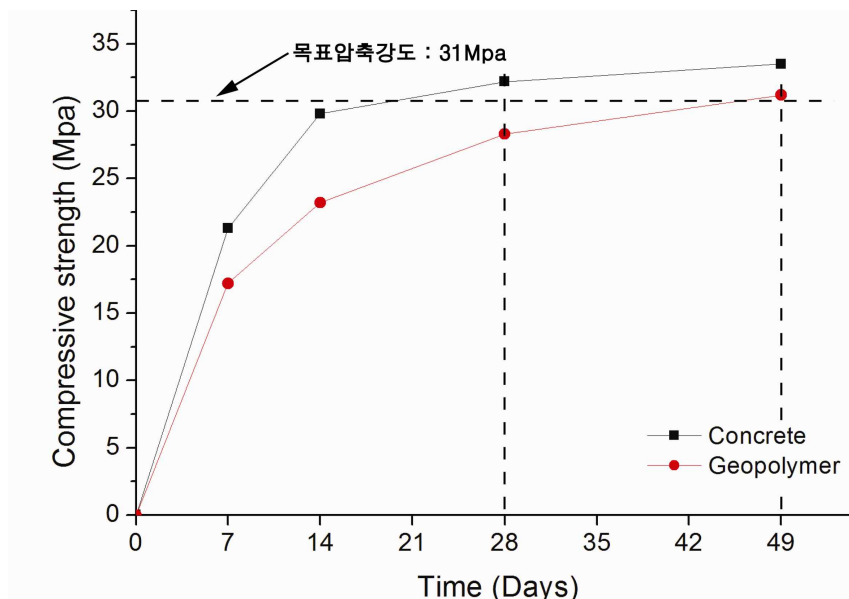
## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 재료의 물성 평가결과

콘크리트와 지오폴리머의 기초적인 물성평가는 슬럼프, 공기량 측정과 압축강도 테스트를 진행하였다. 굳지 않은 콘크리트 실험의 결과는 [표 4-1]에 나타내었다. 콘크리트 시험체 제작에 사용된 배합의 슬럼프 실험결과는 160mm가 측정되었으며 지오폴리머 시험체 배합의 슬럼프는 155mm가 측정되었다. 두 가지 재료의 배합에서 목표 슬럼프인  $160 \pm 20\text{mm}$ 를 만족하는 것으로 나타났다. 공기량은 두 가지 재료에서 콘크리트는 4.5%, 지오폴리머는 4.2%의 결과를 나타내었으며 목표 공기량인  $5.0 \pm 1.0\%$ 를 만족하였다. 압축강도 측정에서는 두 재료의 목표압축강도를 31MPa로 설정하여 배합설계를 하였다. 각각의 재료에 대한 압축강도의 실험 결과를 [그림 4-1]에 나타내었다. 콘크리트의 경우 재령 7, 14, 28, 49일의 압축강도는 21.3, 29.8, 33.5, 34.2MPa가 측정되었으며 지오폴리머 배합의 경우 14.2, 20.2, 26.3, 32.3MPa가 측정되었다. 재령 28일을 기준으로 보았을 때 지오폴리머의 배합이 목표 압축강도에 미치지 못하였으나 재령 49일의 압축강도는 목표압축강도를 만족하였다.

[표 4-1] 슬럼프 및 공기량 측정 결과 값

구분	슬럼프 측정(mm)	공기량 측정(%)
콘크리트	160	4.5
지오폴리머	155	4.2



[그림 4-1] 압축강도 측정 결과 값

## 4.2 자연전위 및 철근 부식을 측정결과

### 4.2.1 자연전위

본 연구의 철근 부식도 평가는 황산구리전극을 이용하여 철근의 자연전위 (-mV) 값을 해양환경 노출조건 및 방식기법별로 정리하였다. 측정값은 실험변수인 외부전원법 적용 유무에 따른 철근 부식도 평가와 철근의 부식 후 외부전원법을 적용하였을 경우 철근 부식도의 평가를 함께 분석하였다. 해양환경 노출조건에 따른 외부전원법의 효과를 비교·분석하기 위하여 각 재료(콘크리트, 지오폴리머)에 따라서 간만대, 침지대, 균열 환경별로 실험 결과를 정리하였고, 부식 정도에 대한 이해를 돕기 위해 시험체에 대한 부식률 및 부식 면적률을 함께 나타내었다. 그리고 부식 후 발생하는 시험체의 국부적인 전위차를 측정하기 위해 시험체의 자연전위차를 측정위치에 따라 평가하여 결과를 정리하였다.

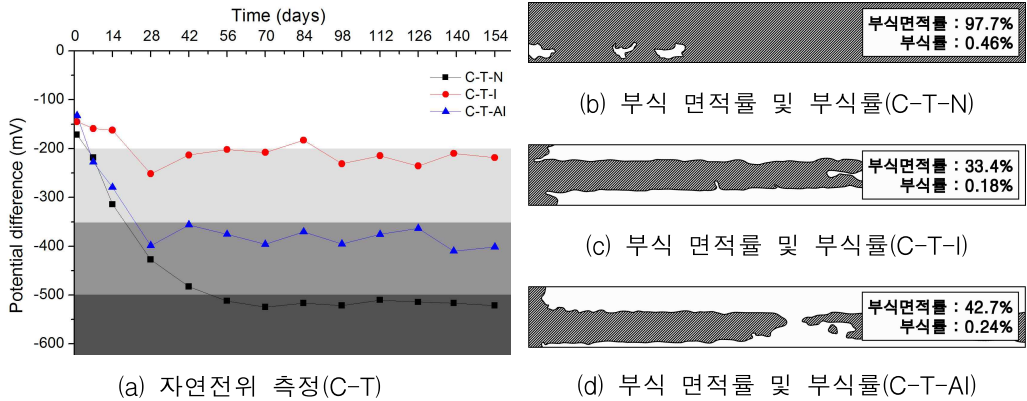


## (1) 간만대

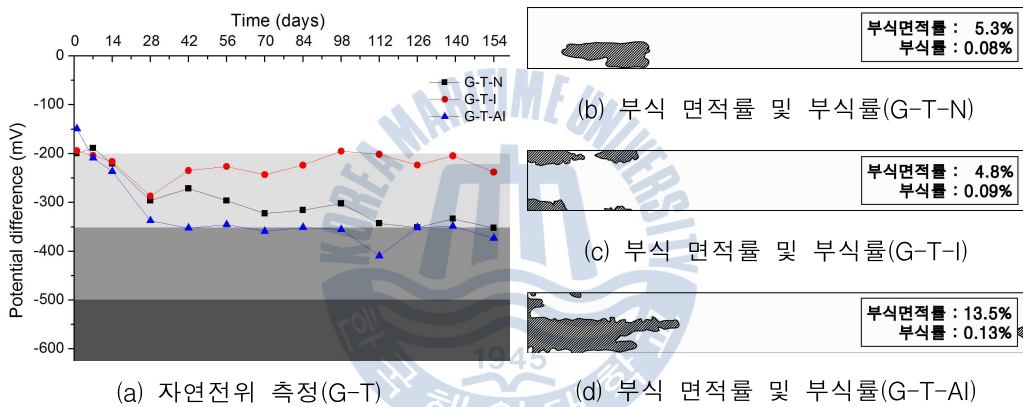
[그림 4-2]와 [그림 4-3]에 간만대 환경을 모의한 콘크리트와 지오폴리머 시험체의 외부전원법 적용에 따른 자연전위차를 측정하여 나타내었다. 외부전원법을 적용하지 않은 콘크리트 시험체(C-T-N)는 28일 시점으로  $-350\text{mV}$  이하의 값이 측정되어 부식으로 판단된다. 부식 후 외부전원법을 적용한 콘크리트 시험체(C-T-AI)는  $-356\text{mV}\sim-410\text{mV}$ 의 자연전위차가 측정되었고 이는 부식의 진행이 느려지는 것으로 판단된다. 외부전원법을 적용한 콘크리트 시험체(C-T-I)는  $-144\text{mV}\sim-251\text{mV}$ 로 매우 안정된 값을 유지하며 부식이 되지 않았음을 확인할 수 있었다.

외부전원법을 적용하지 않은 시험체(G-T-N)와 적용한 시험체(G-T-I)는 부식 영역에 속하지 않는  $-200\text{mV}\sim-350\text{mV}$ 의 값이 측정되었다. 이와 같은 결과는 본 논문 2장에서 설명한 바와 같이 지오폴리머가 일반콘크리트보다 염소 이온과 같은 부식성 이온의 확산이 어려워 철근까지 도달하지 않은 것으로 판단된다. 부식 후 외부전원법을 적용한 지오폴리머 시험체(G-T-AI)는 42일 시점으로 부식 영역의 값이 측정되었으며 이후  $-359\text{mV}\sim-409\text{mV}$ 의 자연전위차를 보이며 부식의 진행이 느려지는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과는 부식 후 외부전원법을 적용한 콘크리트 시험체(C-T-AI)의 결과와 유사하다.





[그림 4-2] 간만대 환경을 모의한 콘크리트 시험체의 측정결과

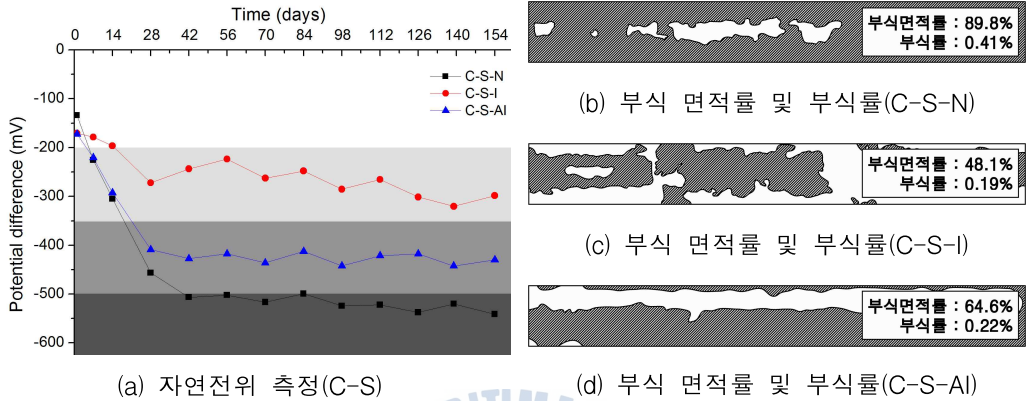


[그림 4-3] 간만대 환경을 모의한 지오폴리머 시험체의 측정결과

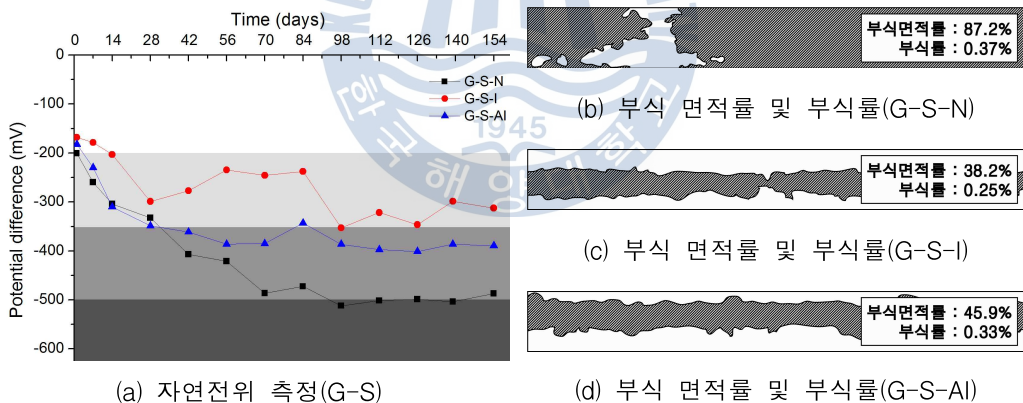
## (2) 침지대

[그림 4-4]와 [그림 4-5]에 침지대 환경을 모의한 콘크리트와 지오폴리머 시험체의 자연전위차를 나타내었다. 외부전원법을 적용한 콘크리트(C-S-I)와 지오폴리머(G-S-I) 시험체 모두  $-200\text{mV} \sim -350\text{mV}$ 의 부식을 일으키지 않는 범위에 들어있는 것으로 관찰되었다. 외부전원법을 적용하지 않은 콘크리트 시험체(C-S-N)는 28일 시점으로 부식 영역에 들어 간 것으로 관찰되었으며 부식 후 외부전원법을 적용한 시험체(C-S-AI)는  $-409\text{mV} \sim -435\text{mV}$ 의 값

이 측정되었다. 부식 후 외부전원법을 적용한 시험체는  $-456\text{mV} \sim -541\text{mV}$ 의 값이 측정된 외부전원법을 적용하지 않은 시험체보다 부식 진행이 느려지는 것을 확인 할 수 있었다.



[그림 4-4] 침지대 환경을 모의한 콘크리트 시험체의 측정결과

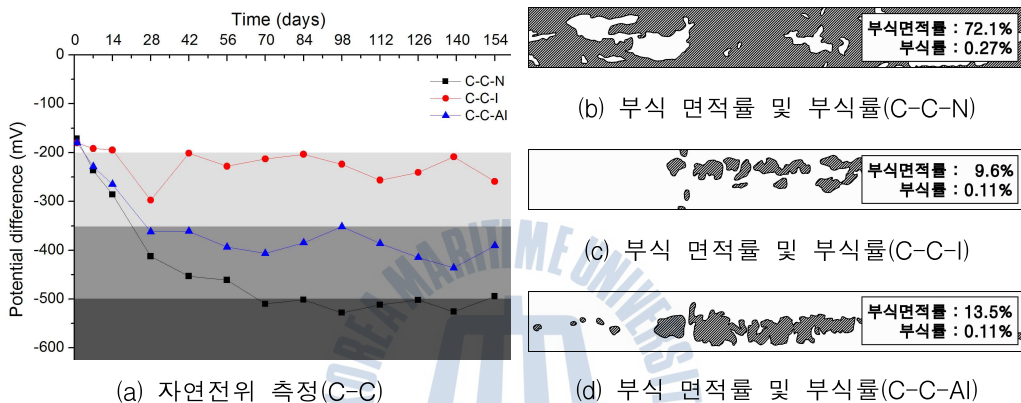


[그림 4-5] 침지대 환경을 모의한 지오폴리머 시험체의 측정결과

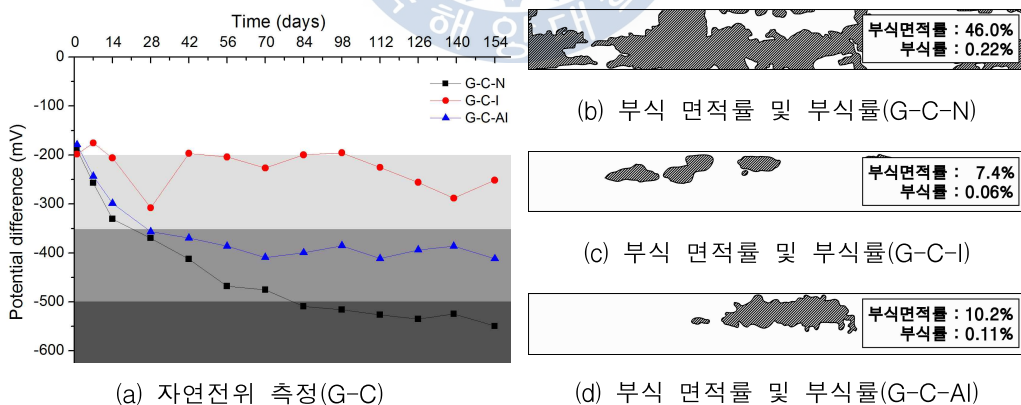
### (3) 균 열

[그림 4-6]과 [그림 4-7]에 균열 환경을 모의한 콘크리트와 지오폴리머 시험체의 자연전위차를 나타내었다. 외부전원법을 적용한 시험체(C-C-I,

G-C-I) 모두 촉진 열화 종료까지  $-200\text{mV} \sim -350\text{mV}$ 의 안정된 값을 유지하며 부식되지 않은 영역에 있음을 확인할 수 있었다. 외부전원법을 적용하지 않은 시험체(C-C-N, G-C-N)의 경우 콘크리트와 지오폴리머 모두 촉진 열화 28일 시점으로 부식이 판단되는 영역의 값이 측정되었다. 부식 후 외부전원법을 적용한 시험체(C-C-AI, G-C-AI)의 자연전위차는 침지대 환경을 모의한 시험체(C-S-AI, G-S-AI)와 비슷한 경향을 나타내었다.



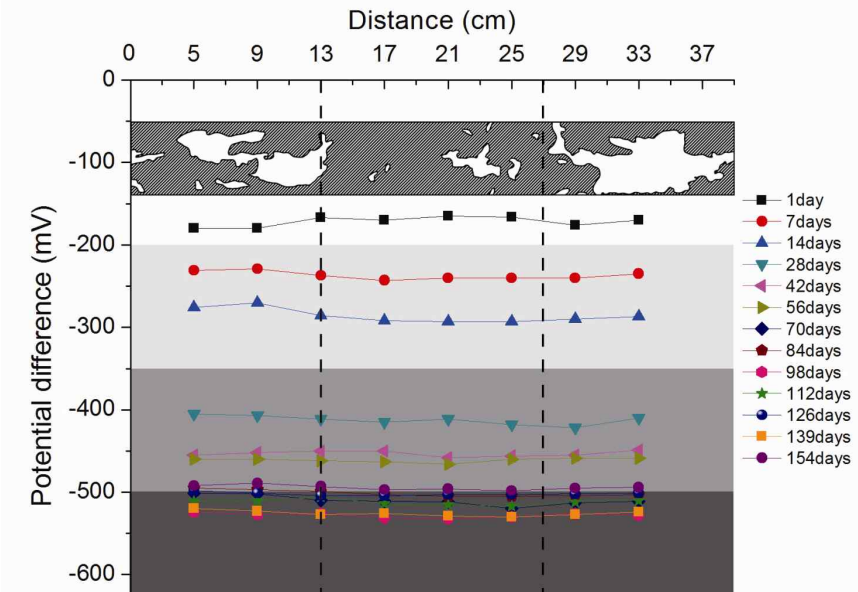
[그림 4-6] 균열 환경을 모의한 콘크리트 시험체의 측정결과



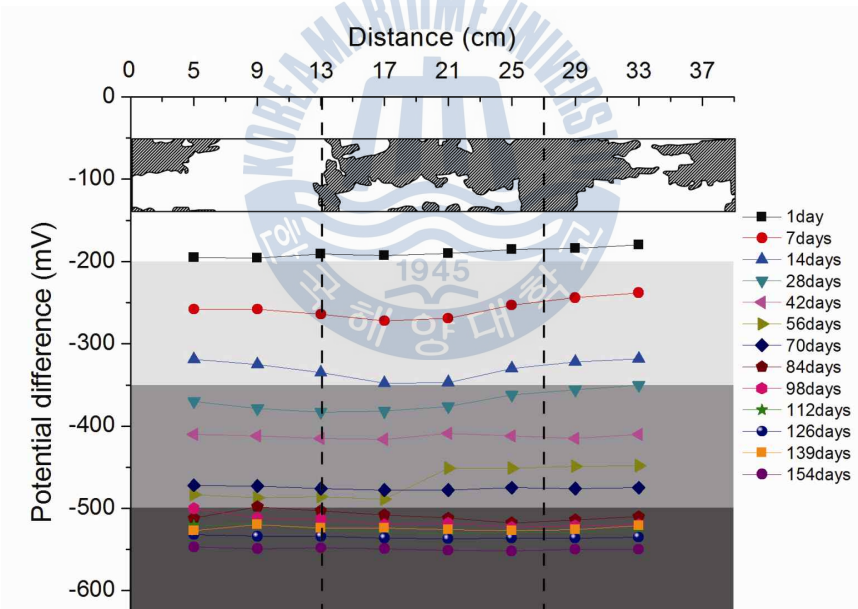
[그림 4-7] 균열 환경을 모의한 지오폴리머 시험체의 측정결과

#### (4) 측정위치에 따른 자연전위

철근이 부식이 되면 국부적인 전위차가 발생하는 것을 2.1.2절 부식 메커니즘에서 설명하였다. 이를 확인하기 위하여 균열 환경을 모의한 시험체의 측정 위치를 구분하여 자연전위차를 측정하였다. [그림 4-8], [그림 4-9], [그림 4-10]은 외부전원법 적용방법에 따른 시험체의 자연전위차를 측정위치별로 나타낸 그래프이며 철근의 부식 면적을 함께 나타내었다. 시험체는 균열 환경을 모의하여 균열을 통해 해수가 침투하였다고 가정을 하였다. 점선부분은 해수가 침투한 부분으로써 배합수를 해수를 사용한 부분이다. 철근의 부식 면적을 보면 알 수 있듯이 배합수를 해수로 사용한 부분에 부식이 집중되고 있다. 부식이 발생한 부분과 부식이 진행되지 않은 부분에 국부적인 전위차가 발생할 것으로 예상을 하였으나 측정된 자연전위차 결과 값은 전체적으로 비슷한 값이 측정되는 경향이 나타났다. Half-Cell을 이용한 자연전위차 측정은 기본적으로 10cm, 50cm, 약 1m 등의 간격으로 전위값을 측정한 뒤 전위선도를 도식하여 평가[34]하지만, 본 연구에서는 측정구간설정을 세밀하게 하여 중간적인 전위 영역에 있어서의 불확실함을 피할 수 없어 다음과 같은 결과가 나타난 것으로 판단된다.

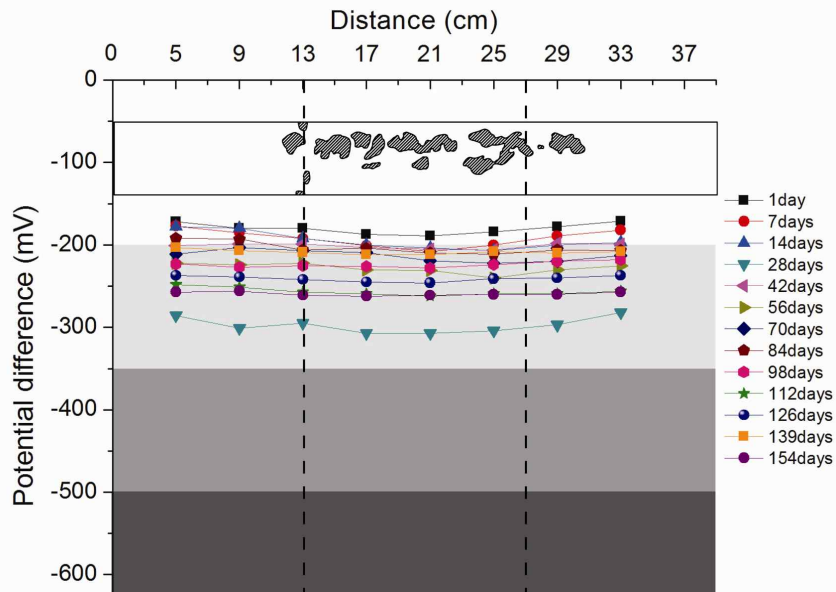


(a) 콘크리트

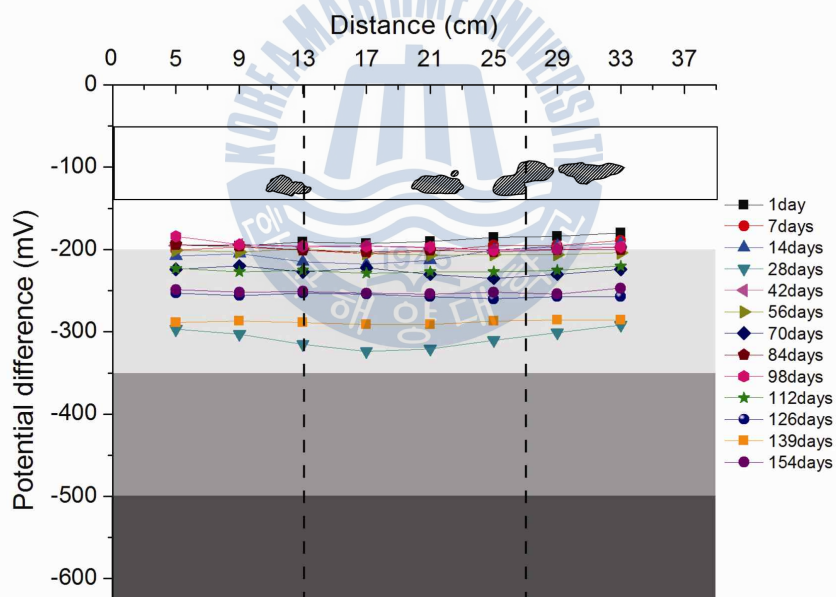


(b) 지오폴리머

[그림 4-8] 측정위치에 따른 자연전위 측정값(외부전원법 비적용)



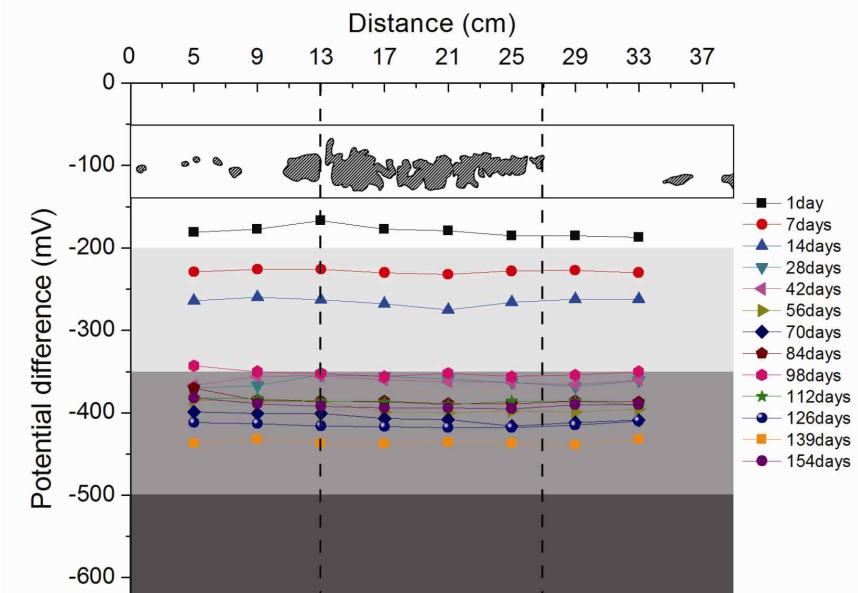
(a) 콘크리트



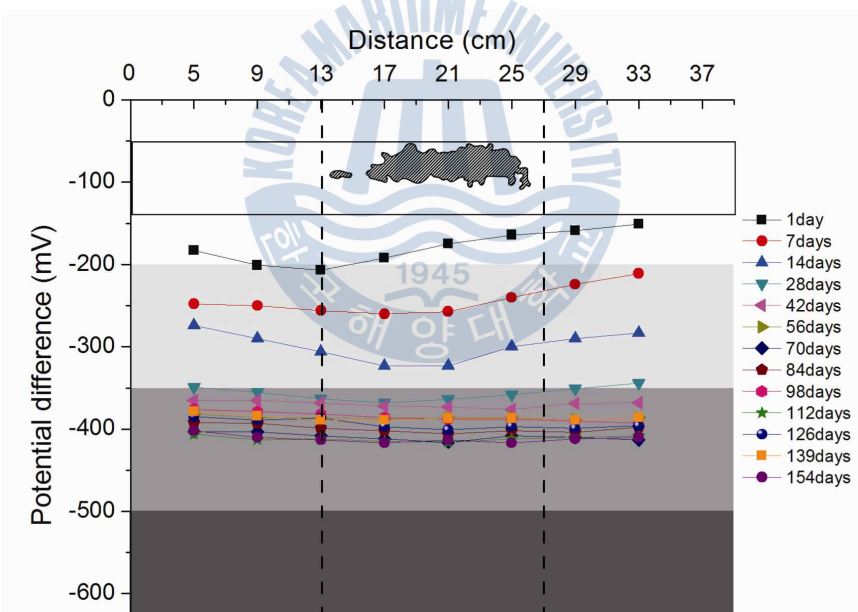
(b) 지오폴리머

[그림 4-9] 측정위치에 따른 자연전위 측정값(외부전원법 적용)





(a) 콘크리트



(b) 지오폴리머

[그림 4-10] 측정위치에 따른 자연전위 측정값(철근 부식 후 외부전원법 적용)

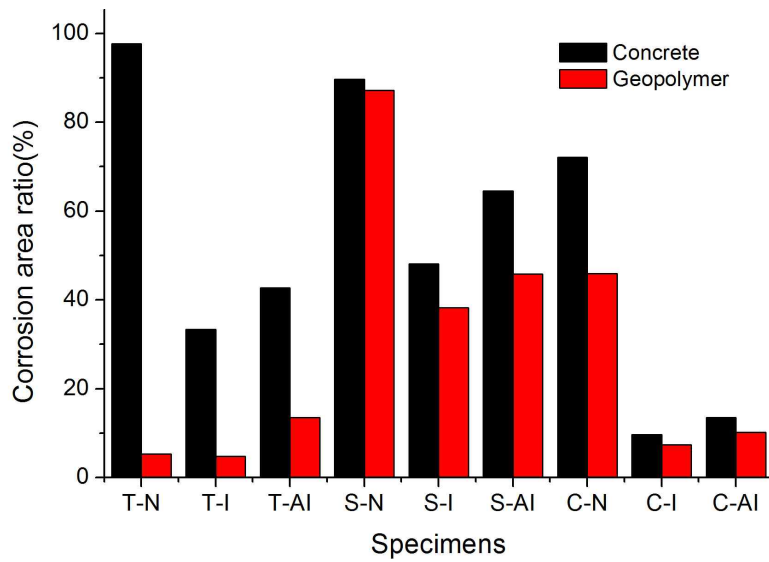
## 4.2.2 철근 부식률

철근 부식률은 촉진 열화 종료 이후 시험체 내부의 철근을 빼낸 뒤 철근의 부식 면적과 중량을 측정하여 철근 부식 면적률 및 철근 부식률을 각각 측정하였다.

### (1) 철근 부식 면적률

[그림 4-11]에 철근 부식 면적률을 측정하여 그 결과 값을 나타내었다. 그 래프에서 알 수 있듯이 간만대를 모의한 외부전원법을 적용하지 않은 콘크리트 시험체(C-T-N)의 철근 부식 면적률은 97.7%가 측정되었으며 외부전원법을 적용하지 않은 지오폴리머 시험체(G-T-N)는 5.3%의 값이 나타났다. 이 두 결과값의 차는 92.4%로 다른 조건의 시험체에 비해 현저히 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 지오폴리머의 염해 저항성이 콘크리트보다 우수하다는 것을 보여주고 있다. 침지대와 균열을 모의한 시험체의 경우 전반적으로 지오폴리머의 철근 부식 면적률이 콘크리트보다 작은 값을 나타내었다. 그리고 각각의 환경에서 외부전원법을 적용하지 않은 콘크리트 시험체는 97.7%(C-T-N), 89.8%(C-S-N), 72.1%(C-C-N)가 나왔고 외부전원법을 적용한 콘크리트 시험체는 33.4%(C-T-I), 48.1%(C-S-I), 9.6%(C-C-I)가 측정되었으며 외부전원법을 적용하지 않은 지오폴리머 시험체는 5.3%(G-T-N), 87.2%(G-S-N), 50.0%(G-C-N)가 나왔고 외부전원법을 적용한 콘크리트 시험체의 경우 4.7%(G-T-I), 38.2%(G-S-I), 7.4%(G-C-I)가 측정되었다. 이러한 결과를 통해 외부전원법을 적용하지 않은 시험체의 경우 전반적으로 외부전원법을 적용한 시험체보다 철근 부식 면적률이 크게 나타났다. 이는 외부전원법을 통해 철근의 부식 진행을 방지하고 있다는 것을 보여주고 있다.



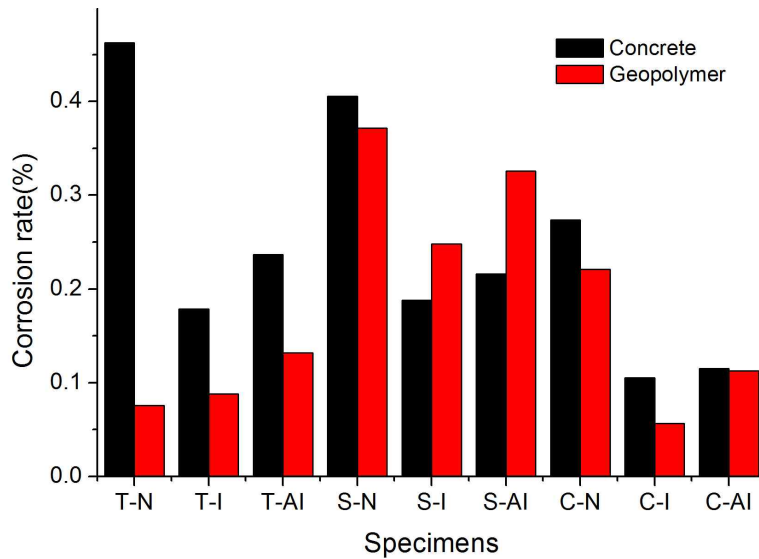


[그림 4-11] 철근 부식 면적을 측정값



## (2) 철근 부식률

[그림 4-12]에 철근 부식률을 측정하여 그 결과 값을 나타내었다. 그래프에서 알 수 있듯이 간만대를 모의한 외부전원법을 적용하지 않은 콘크리트 시험체(C-T-N)의 철근 부식률은 0.46%가 측정되었으며 외부전원법을 적용하지 않은 지오폴리머 시험체(G-T-N)는 0.07%의 값이 나타났다. 이 두 결과값의 차는 0.39%로 다른 조건의 시험체에 비해 현저히 크게 나타났으며 이는 지오폴리머의 염해 저항성으로 인해 시험체에 매설된 철근까지 더 적은량의 염소 이온이 침투되었기 때문에 다음과 같은 결과가 나타난 것으로 판단된다. 각각의 환경에서 외부전원법을 적용하지 않은 콘크리트 시험체는 0.46%(C-T-N), 0.41%(C-S-N), 0.27%(C-C-N)가 나왔으며 외부전원법을 적용한 콘크리트 시험체는 0.18%(C-T-I), 0.19%(C-S-I), 0.11%(C-C-I)가 측정되었다. 그리고 외부전원법을 적용하지 않은 지오폴리머 시험체는 0.07%(G-T-N), 0.37%(G-S-N), 0.22%(G-C-N)가 나왔으며 외부전원법을 적용한 지오폴리머 시험체의 경우 0.08%(G-T-I), 0.24%(G-S-I), 0.05%(G-C-I)가 측정되었다. 이러한 결과를 통해 간만대 환경을 모의한 지오폴리머 시험체의 경우 미소한 차로 외부전원법을 적용하지 않은 시험체의 철근 부식률이 크게 측정되었지만, 나머지 외부전원법을 적용하지 않은 시험체의 경우 전반적으로 외부전원법을 적용한 시험체보다 철근 부식률이 크게 나타났다. 이는 외부전원법을 통해 철근의 부식 진행을 방지하고 있다는 것을 보여주고 있다.



[그림 4-12] 철근 부식률 측정값

[그림 4-11]과 [그림 4-12]를 살펴보면 침지대 환경에서 콘크리트 시험체의 철근 부식 면적률이 지오폴리머 시험체 보다 크게 측정되는 결과를 보이지만, 부식률에서는 외부전원법을 적용한 지오폴리머 시험체와 부식 후 외부전원법을 적용한 지오폴리머 시험체가 콘크리트 시험체의 부식률 보다 더 크게 측정되는 것을 알 수 있었다. 이는 간만대 환경의 외부전원법을 적용한 지오폴리머 시험체에서 다소 국부(공식) 부식 현상이 발생하였기 때문에 이러한 결과가 나타난 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

본 연구는 외부전원법 적용에 있어 지오폐리머 콘크리트 사용에 따른 철근의 방식성능을 평가하였다. 다양하게 모의된 해양노출환경(간만대, 침지대, 균열)하에 Half-Cell을 이용한 자연전위차와 철근 부식 면적률 및 부식률을 이용하여 분석·고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 콘크리트와 지오폐리머 시험체에 외부전원법을 적용하였을 경우 세 가지 환경조건(간만대, 침지대, 균열) 모두에서 방식효과가 나타났으며 이를 바탕으로 외부전원법이 지오폐리머 콘크리트를 사용한 구조물에도 안정적으로 적용 가능하다고 판단된다.

(2) 자연전위차 및 부식 면적률, 부식률 측정결과를 통해 간만대조건(시험체 속의 철근 위치까지 염소 이온의 확산이 예상되는 조건)에서는 지오폐리머의 염해 저항성능을 바탕으로 방식성능이 일반 콘크리트보다 우수하다는 것을 알 수 있었다.

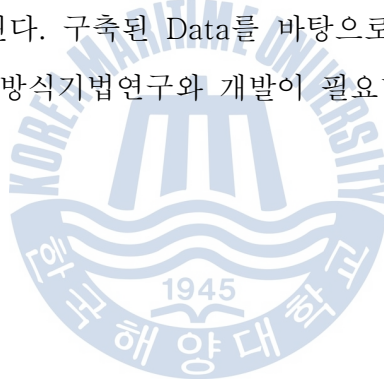
(3) 염해에 의해 시험체 내부의 철근 부식이 진행된 이후 외부전원법을 적용하였을 경우 철근의 부식 진행이 전반적으로 느려지거나 멈추는 경향이 나타났으며 이를 통해 철근의 부식 생성물 발생한 이후에도 외부전원법의 적용이 가능하다고 판단된다.

(4) Half-Cell을 이용한 자연전위차 측정법은 정성적인 평가법으로 철근의 부식 생성물 발생 여부에 대해서 측정할 수 있었으며 철근의 국부적인 전위차 측정에서 측정구간설정을 세밀하게 할 경우 중간적인 전위영역의 불확실함은 극복할 수 없을 것으로 판단된다. 따라서 분극저항법(Linear Polarization

Method)과 같은 정량적인 평가법을 이용하여 철근의 국부전위차를 측정한 부식도 계측이 필요할 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터 지오폐리머 콘크리트에 대한 외부전원법 적용은 다양한 열화 조건 및 외부환경에 노출되는 해양 철근 콘크리트 구조물의 방식기법으로 그 사용성이 적합하다고 판단된다.

향후, 실제해양환경의 폭로실험을 통해 외부전원법을 적용한 지오폐리머 콘크리트의 방식성능을 평가하여 정량적인 철근의 부식도 분석이 필요할 것으로 판단된다. 그리고 해수에 의해 침투되는 염소 이온의 침투깊이 계측을 통해 염소 이온의 확산에 의한 지오폐리머의 방식성능 상관관계를 분석하여 신뢰성 있는 Data의 구축이 요구된다. 구축된 Data를 바탕으로 국내환경에 적합한 해양 철근 콘크리트 구조물의 방식기법연구와 개발이 필요할 것으로 판단된다.



## 참고 문헌

1. 김성수, “해양환경하에 방치한 콘크리트의 열화 및 철근의 부식 방식에 대한 연구”, 박사학위논문, 한양대학교, 1994
2. 문한영 외, “콘크리트 중의 철근 부식 억제를 위한 외부전원법의 효과”, 콘크리트학회 논문집, 제22권, 제2호, pp.221~230, 1999
3. 이상국, “염해 환경에 노출된 철근 콘크리트의 철근 방식기법 연구”, 석사학위논문, 중앙대학교, 2001
4. 문홍식, “해양·항만 철근 콘크리트의 철근 방식기법 연구”, 석사학위논문, 중앙대학교, 2001
5. 이광수, “외국에 있어서 철근 콘크리트 구조물의 염해 대책 사례”, 한국구조물진단학회지, 제4권, 제3호, pp.30~38, 2000
6. 송진규 외, “지오폐리머 콘크리트의 개발 동향”, 대한건축학회지, 제54권, 제2호, pp.26~28, 2010
7. 이강필 외, “친환경 고성능 지오폐리머 페이스트의 적정배합 도출에 관한 연구”, 한국건축시공학회 추계학술발표대회 논문집, 제9권, 제2호, pp.107~110, 2009
8. 한국콘크리트학회, “콘크리트 표준시방서 해설”, 2009
9. ACI Committee 222, “Corrosion of Metals in Concrete”, ACI Journal, Jan.~Feb., 1985
10. 한국콘크리트학회, “해양콘크리트의 염해 내구성 및 설계”, 2010
11. Mars G. Fontana, “Corrosion Engineering”, 3to, McGraw-Hill, pp.453~454, 1986
12. 문한영 외, “해수 침식을 받은 콘크리트의 성능 저하 원인 규명”, 대한토목학회 논문집, 제22권, 제1A호, pp.171~179, 2002
13. 김은겸 외, “해안콘크리트 구조물의 염화물 이온 이동 및 철근 부식에 관

- 한 실험적 연구”, 대한토목학회 논문집, 제18권, 제I-4호, pp.447~455, 1998
14. John P. Broomfield, “Corrosion of Steel in Concrete”, E&FN SPON, pp.143~147, 1997
15. 건설교통부, “콘크리트 구조물의 내구성 향상을 위한 철근 방식 방안 연구”, 1997
16. 이의호, “부식과 방식이론”, 강구조학회지, 제8권, 제2호, pp.27~34
17. 이학렬, “금속 부식 공학”, 연경문화사, 1995
18. 한정섭, “알기쉬운 부식 및 방식공학”, 제6장, 반도 출판사, 1998
19. 이종득, “철근 부식 진단”, 제1장, 도서출판 일광, 2004
20. Bennet J & Turk T, “Criteria for the Cathodic Protection of Reinforced Concrete Bridge Elements”, SHRP-S-359, SHRP, US, pp.3~14, 1994
21. 정진아, “철근 콘크리트 구조물의 부식 및 방식 모니터링에 관한 연구”, 박사학위논문, 부산대학교, 2013
22. 권강석, “고로슬래그 미분말 혼합콘크리트의 압축강도에 영향을 미치는 알칼리 자극제의 효과”, 석사학위논문, 한양대학교, 2002
23. 이종규 외, “Geopolymer의 현황과 전망”, DBPIA-세라미스트 제9권, 제3호, p44~49, 2006
24. 김춘미, “지오폴리머 콘크리트의 활용방안에 대한 연구”, 석사학위논문, 전남대학교, 2009
25. Geopolymer Institute (<http://www.geopolymer.org>)
26. 송진규 외, “고로슬래그와 나트륨계열 활성화제를 이용한 무시멘트 모르타르의 특성”, 대한건축학회지, 제26권, 제6호, pp.61~68, 2010
27. 김홍삼, “고로슬래그 미분말을 혼입한 고내구성 해양콘크리트의 염해 내구 특성 평가”, 대한토목학회 학술저널, 제10호, pp.3140~3143, 2009
28. 최순석, “플라이애시 배합방법에 따른 콘크리트 염화물 확산 특성”, 석사학

위논문, 동의대학교, 2012

29. 이종구, "사회적 요구에 부응하는 신재료 지오폴리머", 한국건축시공학회지, 제10권, 제6호, pp.27~31, 2010

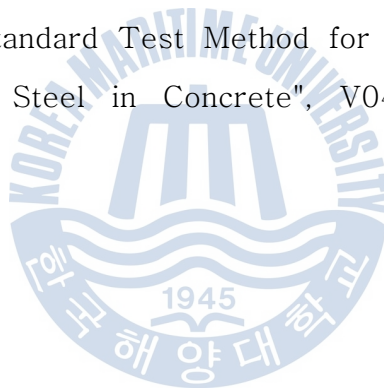
30. 김기준 외, "콘크리트구조물의 전기방식 원리와 적용", 콘크리트학회지, 제18권, 제5호, pp.23~33, 2006

31. 박찬모, "방식기법에 따른 콘크리트 내의 철근의 부식 모니터링", 석사학위논문, 안동대학교, 2003

32. (주)큐씨맨 인터내셔널, "Half-Cell 200 전위차식 콘크리트 철근 부식 측정기", (주)큐씨맨 인터내셔널

33. 김현욱 외, "철근의 부식률이 콘크리트의 부착강도에 미치는 영향", 대한건축학회지, 제21권, 제11호, pp.159~166, 2005

34. ASTM C 876, "Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete", V04.32, S4, pp.440~445, 1993





## 감사의 글

“건설시공 및 사업관리 연구실”이라는 집단에 일원이 된지 2년 10개월이 지났습니다. 그동안 알고 지내며 많은 도움을 주신 모든 분들에게 감사의 마음을 전하고 싶습니다. 우선 연구에 대해 문외한인 저를 한없는 인내심과 가르침으로 끝까지 이끌어주신 박동천 지도교수님께 감사의 마음을 전하고 싶으며 대학원 수업과 뜻 깊은 조언으로 신경써주신 해양건축공학과 대학원 모든 교수님들께도 깊이 감사를 드립니다. 그리고 우리 “건설시공 및 사업관리 연구실”의 만형으로 연구 및 개인적인 고민에 항상 귀기울여 들어준 규환이형에게 깊은 감사를 드립니다. 연구실 식구 근석이형, 종필이, 정필이, 현이, 재민이, 명현이 그리고 연구실생활을 하며 즐거움과 고생을 함께 나눈 동기 종욱이에게도 고마움을 전하고 싶습니다. 논문을 마무리 하면서 바쁜 와중에도 성심껏 질문에 필요한 자료를 제공해주신 영준이와 지오폴리머 배합에 도움을 준 전남대 시공재료연구실에도 감사의 마음을 전하고 싶습니다.

저의 철없음에도 제가 학문에 정진할 수 있도록 모든 것을 희생하며 믿어주신 부모님께 진심으로 감사를 드리며 앞으로 성장해가는 아들의 모습을 계속 지켜봐주셨으면 좋겠습니다.

부끄럽고 작은 결실로 석사학위과정을 마무리 하고 사회에 첫발을 내딛으려 합니다. 이 새로운 시작을 항상 그래왔듯이 차근차근 다시 준비하려 합니다. 항상 노력하는 모습으로 보내주신 관심과 믿음에 보답하며 나아가도록 하겠습니다.